

М. В. Сажин

СОВРЕМЕННАЯ КОСМОЛОГИЯ

*в популярном
изложении*



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. П.К.ШТЕРНБЕРГА

М.В.Сажин

СОВРЕМЕННАЯ КОСМОЛОГИЯ

*в популярном
изложении*



УРСС

Москва • 2002



Настоящее издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 02-02-30026)

Сажин Михаил Васильевич

Современная космология в популярном изложении. — М.: Едиториал УРСС, 2002. — 240 с.

ISBN 5-354-00012-2

В книге представлены достижения космологии за последние несколько десятилетий. Обсуждаются основные наблюдательные факты, образующие фундамент современной науки о Вселенной в целом, о ее прошлом и будущем, а также основные идеи, лежащие в основании теории ее строения. Дана целостная картина, включающая вопросы рождения и развития нашей Вселенной на самых ранних стадиях, а также вопросы образования ее современной структуры. Обсуждены проблемы инфляционной стадии, бариосинтеза, связи с физикой элементарных частиц, реликтового излучения, крупномасштабной структуры Вселенной. Рассмотрен вопрос ускоренного расширения нашей Вселенной, а также явления гравитационного линзирования. Изложение ведется с помощью элементарной математики, доступной школьникам старших классов общеобразовательной школы.

Книга предназначена для старших школьников, студентов, аспирантов, всех, интересующихся космологией.

Фотография на первой странице обложки приводится с любезного согласия П. Чаллиса.

Рисунки выполнены при участии Л. М. Сажиной.

Издательство «Едиториал УРСС». 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9.
Лицензия ИД № 05175 от 25.06.2001 г. Подписано к печати 29.04.2002 г.
Формат 60×90/16. Тираж 2500 экз. Печ. л. 15. Зак. № 18.

Отпечатано в типографии ООО «Рохос». 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 9.

ИЗДАТЕЛЬСТВО **УРСС**
НАУЧНОЙ И УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ



E-mail: urss@urss.ru
Каталог изданий
в Internet: <http://urss.ru>
Тел./факс: 7 (095) 135-44-23
Тел./факс: 7 (095) 135-42-46

ISBN 5-354-00012-2



© М. В. Сажин, 2002
© Едиториал УРСС, 2002

Введение

Эта книга написана в конце двадцатого века. Естественно, автору хочется упомянуть здесь важнейшие события в космологии, которые происходили в течение последних ста лет.

Двадцатый век характеризуется выдающимся прогрессом науки; в 1905 году родилась новая физика — релятивистская (А. Эйнштейн), а несколько раньше — квантовая (М. Планк), изменившая наши взгляды на структуру пространства-времени и структуру физических взаимодействий. Следствием этих открытий явились большие успехи в объяснении структуры материи и Вселенной. В начале века появилась также современная космология. Дата рождения современной космологии известна достаточно точно. Обычно ее отсчитывают от времени публикации статей А. А. Фридмана. В 1922 г. в немецком журнале "Zeitschrift für Physik" была опубликована статья А. А. Фридмана «О кривизне пространства». Основным вывод этой работы заключался в том, что наша Вселенная эволюционирует, она расширяется, а ее собственный объем растет.

Эти выводы были настолько необычны, что даже А. Эйнштейн вначале воспринял их со скепсисом. Конечно, идея постоянного изменения не столь уж и необычна. Постоянные изменения мы наблюдаем в повседневной жизни; наблюдаются они и в космическом пространстве. День сменяется ночью, лето — зимой, год — годом. Но астрономы привыкли больше к циклическим изменениям. Причем эти циклические изменения происходят на фоне стационарной звездной картины. Идея поступательной эволюции во времена А. А. Фридмана была по-настоящему революционной. Сам А. Эйнштейн в 1917 г. создал модель стационарной Вселенной, в которой не было эволюции, у которой бесконечно много времени было в прошлом и бесконечно много времени в будущем, хотя позже он признал правильность идей

А. А. Фридмана. Космологическая модель А. А. Фридмана, в которой было начало, или, как говорят сегодня, момент рождения, вначале была воспринята отталкивающе. Тем не менее она была подтверждена наблюдениями и сейчас является общепринятой.

В начале нашего века космология рассматривалась многими учеными как абстрактная наука, далекая даже от основных запросов фундаментальной физики и астрономии. До Второй мировой войны число специалистов, которые занимались космологией, можно было пересчитать по пальцам. Это было не удивительно, так как научная космология основывалась лишь на одном факте — расширении Вселенной.

Ситуация значительно изменилась в шестидесятых годах двадцатого века. Эти годы положили начало «эпохе великих астрономических открытий». Среди прочих открытий, изменивших наши представления о Вселенной, было сделано открытие реликтового излучения.

Открытия в космологии следовали одно за другим. Особенно плодотворным оказались последние два десятилетия нашего века. Все это вызвало необычайный рост популярности космологии как в среде астрономов, так и в среде физиков. Число специалистов, которые тем или иным образом вовлечены в занятия космологией, приближается к нескольким тысячам. Число статей, посвященных космологии и связанным с ней областям науки, быстро растет. Появилась новая наука — космомикрорфизика, объединяющая в единую область науки космологию и физику элементарных частиц, которые теперь концептуально обогащают друг друга.

Эта книга является популярным изложением основных идей и фактов космологии; она построена по следующему принципу.

Вначале будет сказано о том, что такое космология, каков предмет ее изучения, рассказано о состоянии этой науки в последние два десятилетия.

Как и всякая наука, космология имеет набор наблюдений, или экспериментальных свидетельств, которые являются для нее критическими. Каждый из таких экспериментов являлся решающим в выборе современных взглядов на эволюцию и строение нашей Вселенной. Сразу после первой главы в книге будут описаны именно такие критические наблюдательные тесты космологии.

Затем идет краткое описание истории Вселенной, дается характеристика каждой эпохи, которая является важной вехой в существовании нашего мира. Первые три главы являются как бы расширенным введением.

Собственно сама космология излагается ниже. Рассказ о ней начинается с описания законов, которые управляют эволюцией в нашей Вселенной, подробного повествования о каждой эпохе ее развития, об экспериментальных исследованиях, которые обеспечивают космологию фактами.

Несколько в стороне от основного изложения лежат последние две главы книги, посвященные некоторым интересным, хотя и экзотическим проблемам современной космологии. Эти главы принадлежат, скорее, жанру научной фантастики. Они включены в книгу из-за их несомненной притягательности, из-за того, что они поднимают проблемы волнующие, пожалуй, всех.

Исторические справки, которые время от времени встречаются в книге, будут, в основном, касаться российских космологов, их вклада в изучение космологии в двадцатом веке.

Современная космология представляет из себя чрезвычайно широкое поле деятельности, ее можно условно подразделить на наблюдательную космологию, физическую космологию и математическую космологию. Каждый из разделов представляет, фактически, особую область науки. Автор не может претендовать на исчерпывающее знание всех разделов космологии, поэтому особое внимание будет уделяться лишь наблюдательной и физической космологии, а также тем из ее разделов, которые являются привлекательными с гносеологической точки зрения.

Немного о стиле изложения. Книга является популярной. Автор старался подробно объяснять встречающиеся термины, основные идеи и понятия космологии. Тем не менее полностью в популярной книге это сделать невозможно. Как и всякая естественная наука, космология имеет свой язык — математическое описание явлений и процессов. Человеческий язык слишком беден для того, чтобы описать физические и космологические явления без привлечения математики. Не всегда помогают и аналогии, а для некоторых процессов аналогии из обыденной жизни просто отсутствуют.

Все же автор старался опускать сложные описания, включающие математические формулы. Читатель найдет в книге небольшое количество формул, которые используются в том случае, когда описание словами либо невозможно, либо слишком отягощает книгу. Для того чтобы основные идеи были поняты и восприняты неспециалистами, использовались математические понятия не сложнее тех, которые входят в программу старших классов средней школы.

И последнее. Сегодня космология переживает «золотой век». Она становится чрезвычайно популярной. Создаются научные организации, посвященные изучению космологии, в обществе становится престижным и модным говорить о ней, слушать лекции специалистов-космологов. Социальные институты обращают свое внимание на космологию. Папа Иоанн Павел II в специальном послании указывает, что современная космология согласуется с библейскими истинами, иерархи православной церкви посвящают ей книги¹⁾, телевидение представляет возможности для выступления перед широкой аудиторией С. Хокингу — одному из знаменитых космологов современности, другим специалистам. Все это свидетельствует о большой популярности космологии в современном обществе, а следовательно, вселяет надежду на то, что эта область естествознания будет востребована в современном обществе еще в течение долгого времени.

Автору хочется выполнить приятный долг и поблагодарить М. Е. Прохорова, В. Н. Семенцова, О. С. Хованскую, которые помогали в работе над книгой, а также В. Г. Сурдина, беседы с которым вдохновили меня на написание книги.

¹⁾ *Епископ Василий (Родзянко). Теория распада Вселенной и вера отцов. М.: Изд-во «Православный паломник», 1996.*

Что такое космология?

Предмет изучения космологии был сформулирован сравнительно недавно — в начале двадцатого века. В конце этого века определение того, чем занимается космология, начинает подвергаться ревизии. Хотя отсутствуют (или, правильно сказать, почти отсутствуют) экспериментальные свидетельства процессов, которые предсказывает современная космология, становится понятным, что предмет космологии значительно шире, чем его сформулировали несколько десятилетий назад. В принципе, сейчас космология начинает описывать события, которые являются принципиально ненаблюдаемыми с точки зрения современной физики, процессы, свидетельства о которых надежно скрыты от нас толщами сверхвещества и сверхвысоких температур. Тем не менее автор приводит то определение космологии, которое он услышал, будучи студентом Московского государственного университета тридцать лет назад.

Предмет космологии

Космология — это наука, которая изучает Вселенную в целом, наиболее общие законы ее развития, наиболее общие эпохи ее истории. Как наука она родилась относительно недавно — в начале двадцатого века. Хотя многие ученые, жившие раньше, задумывались о наиболее общих законах Вселенной, экспериментальный и теоретический фундамент для изучения Вселенной был заложен после создания А. Эйнштейном общей теории относительности, после открытия Э. Хабблом факта расширения нашего мира.

Теоретические основы современной космологии были созданы российским ученым Александром Александровичем Фрид-

маном, который впервые получил решения уравнений общей теории относительности для случая изотропного и однородного распределения вещества. Термин «изотропия» означает, что свойства вещества Вселенной, наблюдаемые из одной точки, в разных направлениях являются одинаковыми. Термин «однородность» означает, что свойства вещества в разных точках пространства тоже одинаковы. Основные характеристики вещества — это плотность, давление и температура. Именно они распределены однородно и изотропно. Конечно, в земных условиях вещество далеко от однородности и изотропии. Поверхность Земли и воздух, находящийся над ней, обладают различной плотностью. Однако, если мы рассмотрим куб с ребром $3 \cdot 10^{18}$ см (в астрономии эта единица измерения носит название один парсек, сокращенно пк) и посчитаем среднюю плотность в нем, а затем будем передвигать этот куб, то обнаружим, что контраст плотности значительно меньше, чем в земных условиях. В космологии масштаб, с которого Вселенная становится приблизительно однородной и изотропной, имеет размер 200 000 000 парсек или 200 мегапарсек (сокращенно 200 Мпк).

Теоретически предсказанное Фридманом расширение Вселенной было обнаружено несколько лет спустя Хабблом, и закон расширения, который имеет весьма простой вид:

$$\vec{v} = H \vec{r}, \quad (1.1)$$

сейчас носит имя Хаббла. В этом законе \vec{v} — скорость далекого объекта (например, галактики или квазара), H — постоянная Хаббла, \vec{r} — расстояние до объекта. Согласно современным измерениям, постоянная Хаббла равна:

$$H = 65 \frac{\text{км/с}}{\text{Мпк}}.$$

Этот закон устанавливает следующий факт. Если внегалактический объект находится от нас на расстоянии, равном, например, 100 Мпк, то он удаляется от нас со скоростью, равной 6 500 км/с.

Название «постоянная Хаббла» сложилось исторически и не является абсолютно точным по смыслу. Оно подчеркивает тот

факт, что H не зависит от расстояния и от направления на объект. Термин «постоянная», однако, несколько затемняет зависимость от времени. Поэтому иногда мы будем называть H параметром Хаббла. Размерность постоянной Хаббла обратно пропорциональна времени.

Следует специально подчеркнуть, что закон (1.1) справедлив для объектов, которые находятся довольно далеко от нашей Галактики. Звезды, шаровые скопления и другие объекты, составляющие нашу Галактику (размер ее дисковой составляющей ~ 30 килопарсек или 30 кпк), движутся не по закону Хаббла.

Закон Хаббла начинает выполняться только для других галактик, которые находятся от нас на расстоянии больше 10–20 Мпк.

Поскольку постоянная Хаббла определяет закон расширения нашей Вселенной, а следовательно, рост ее объема, то, грубо говоря, обратное значение величины постоянной Хаббла $H^{-1} = 14\text{--}20$ млрд лет равно возрасту Вселенной. Действительно, обратим закон расширения (1.1) и отсчитаем время, необходимое для того, чтобы Вселенная сжалась до нулевого размера. Такое время равно H^{-1} , хотя точные вычисления (более правильные, чем по простой формуле (1.1)) дают несколько отличное время.

Космология в последние годы XX столетия

Несколько последних десятилетий XX века были периодом интенсивного развития космологии. За это время было открыто и исследовано реликтовое излучение, его природа и взаимодействие с межгалактическим веществом. Стало понятно, в каких характеристиках реликтового излучения «зашифрованы» данные о наиболее ранних этапах эволюции Вселенной. Была открыта и получила свое объяснение крупномасштабная структура Вселенной и, наконец, стали понятны, по крайней мере на качественном уровне, некоторые фундаментальные вопросы космологии: почему наша Вселенная однородна и изотропна, почему она расширяется, что послужило первоначальным толчком, почему во Вселенной есть вещество и практически отсутствует

антивещество и т. п. Перечисленные проблемы тесно связывают современную космологию и физику элементарных частиц и активно исследуются как космологами, так и специалистами по физике. Осознание того факта, что в ранней Вселенной была высокая температура и энергии элементарных частиц достигали значений, о которых могут только мечтать специалисты по ускорителям элементарных частиц, позволяет иногда называть Вселенную «ускорителем бедного человека». Смысл этого высказывания в том, что в ранней Вселенной естественным образом реализовывались энергии, на много порядков превышающие те энергии, которые сегодня доступны физике ускорителей.

Бесспорно, основной источник прогресса космологии — развитие современной наблюдательной техники, становление астрономического и космического эксперимента. Здесь следует упомянуть как развитие классических наблюдений с поверхности Земли, так и развитие наблюдений из космоса, сделанных космическими аппаратами, например, спутниками «Реликт» и «COBE».

Следующим фактором успеха является развитие физической теории. Следует сказать, что космология в целом использует, прежде всего, общую теорию относительности, а также достижения квантовой теории и достижения современной физики элементарных частиц. Можно упомянуть, что запросы космологии растут значительно быстрее, чем возможности современного физического эксперимента. Поэтому в космологии используются физические теории, еще не проверенные в эксперименте. Более того, если несколько десятилетий назад для объяснения астрономических явлений, таких как энерговыделение в звездах, активно использовалась физическая теория¹⁾, то теперь наблюдается обратное явление — астрономические и космологические данные используются для проверки физических теорий на «жизнеспособность». Одной из лучших проверок такого рода является сравнение предсказаний отдельных теорий с результатами наблюдений анизотропии реликтового излучения.

¹⁾ Физические теории получали статус истинных теорий после тщательной проверки их в лабораториях.

Еще один аспект современной космологии связан с изучением распределения темной, невидимой, материи. Открытие того факта, что наш мир на 90 % состоит из вещества непонятной природы, оказал сильное влияние на физиков. Вызов, принесенный этим простым фактом, привлек внимание сообщества физиков к наблюдениям, связанным с астрономией. Хотя физический подход к проблеме значительно отличается от астрономического, исследования переплетаются, давая пищу как астрономии, так и физике.

К моменту, когда пишется книга, сам факт существования темной материи не вызывает сомнения. Однако, природа этой материи до сих пор неизвестна. Во многом даже неизвестна форма, в которой это вещество присутствует во Вселенной. Она может быть, например, в форме связанных тел, подобных планетам и звездам, а может быть в распределенной форме, как материя, состоящая из элементарных частиц, распределенных в пространстве. Вполне возможно, что во Вселенной существует несколько видов темной материи, каждый из которых существует в определенной форме, отличной от других видов. С этими исследованиями тесно связаны наблюдательные исследования гравитационных линз и крупномасштабной структуры Вселенной.

Недавняя история и перспективы космологии

Новые открытия в космологии следуют одно за другим. После открытия реликтового излучения (середина 60-х годов XX века), крупномасштабной структуры Вселенной (конец 70-х, начало 80-х годов) последовало открытие анизотропии реликтового излучения (1992 год). Последние годы ушедшего века принесли новое открытие. Сейчас оно уже независимо подтверждено тремя группами и является самым интересным открытием науки конца века — имеется в виду открытие того факта, что наша Вселенная расширяется с ускорением. Ускоренное расширение можно объяснить наличием материи особого вида — «квинтэссенции». Ничего подобного этому виду материи в земных условиях не существует. По своим свойствам она подобна вакууму, но обладает ненулевой плотностью.

Существует ли такое вещество или, лучше сказать, новая форма материи — об этом нам будет известно в будущем.

Наконец, одним из самых увлекательных сюжетов современной космологии является исследование очень ранней Вселенной, ее эволюции в первые секунды после Большого Взрыва. Экспериментальные данные об этих стадиях эволюции Вселенной почти отсутствуют, но значение таких исследований велико. Они позволяют на уровне первых принципов ответить на вопросы, которые не принадлежат к проблемам физики или астрономии, а являются, скорее, наиболее общими вопросами современного естествознания.

Космология имеет хорошие шансы стать «супернаукой» XXI века — наукой, которая объединит усилия астрономов, космологов и физиков. Сейчас такая новая наука уже формируется. В англоязычной литературе она носит название “Astroparticle Physics”, в русскоязычной литературе несколько тяжеловесное название «космомикрофизика».

Хочется сказать несколько слов о том, как начиналась наука «Космомикрофизика».

Вернемся в восьмидесятые годы. Эпоха перестройки, гласности, время надежд на лучшее, резкая активизация общественной жизни. В те годы был заложен фундамент новой науки. Инициатором зарождения космомикрофизики был выдающийся советский физик, космолог — академик АН СССР Я. Б. Зельдович. Он предложил создать научный совет по новой проблеме. Проблема была условно названа «Космология и физика элементарных частиц». Новое дело потребовало усилий — в частности, организационных, бюрократических усилий. Яков Борисович не успел осуществить свою идею, 2 декабря 1987 г. его не стало. Идея оформления новой науки продолжала жить. К тому времени из ссылки вернулся академик А. Д. Сахаров, которому Президиум АН СССР поручил возглавить научный совет. Такой совет вскоре был сформирован, он был назван «Космология и микрофизика», его цели и задачи были сформулированы в статье, опубликованной в «Вестнике АН СССР» [7]. Эту статью подготовил коллектив авторов, которые на тот момент являлись самыми квалифицированными специалистами в области космологии.

Интересна судьба авторов статьи в «Вестнике АН СССР». С. Ф. Шандарин, Л. А. Кофман, А. Д. Линде сейчас живут и работают в США, А. Д. Долгов — в Италии. М. Ю. Хлопов является президентом Центра по изучению космомикрoфизики «Космион», Москва, Россия, А. Л. Судариков стал сотрудником Министерства по науке РФ. В. Л. Афанасьев, И. Д. Караченцев, Ю. Н. Парийский, М. В. Сажин, Я. Э. Эйнасто продолжают работать в своих научных учреждениях. Трех авторов — Я. Б. Зельдовича, А. Д. Сахарова и В. А. Липовецкого — уже нет с нами. Совет тоже, к сожалению, прекратил свое существование. Теперь роль координатора исследований по космомикрoфизике выполняет подсекция секции совета по астрономии президиума РАН. Возглавляют эту подсекцию два координатора — профессор М. Ю. Хлопов и член-корреспондент РАН А. А. Старобинский.

Интересно сравнить задачи, опубликованные в 1989 г., с современным положением дел. Удалось предугадать развитие науки в области изучения крупномасштабной структуры Вселенной, изучения реликтового излучения, в частности, открытие анизотропии реликтового излучения. Полной неожиданностью стало открытие ускоренного расширения нашей Вселенной. Удалось предугадать тенденции развития космомикрoфизики — создание аналогичных структур вначале в США, а затем в Великобритании, Франции, Италии и других странах. Как видно из этого перечисления, новая наука имеет хорошие перспективы.

Тесты космологии

Как и всякая наука, космология имеет набор наблюдений или экспериментальных свидетельств, которые являются для нее критическими. Каждый из таких экспериментов был решающим в становлении современных взглядов на эволюцию и строение нашей Вселенной. Опишем именно такие критические наблюдательные тесты космологии.

Расширение нашей Вселенной

Сам факт расширения Вселенной считался твердо установленным уже несколько десятилетий назад, хотя причины, приведшие к такому закону эволюции, вплоть до последнего времени являлись загадочными. Стандартная космологическая модель Фридмана не могла ответить на вопрос о физических причинах разлетания галактик, несмотря на то, что силы притяжения противодействовали этому разлету. Ответ на этот вопрос удалось дать лишь в последние годы благодаря применению результатов, полученных в современной физике элементарных частиц, к ранней Вселенной.

Закон расширения был экспериментально обнаружен следующим методом. Э. Хаббл построил диаграмму: скорость удаления галактики—расстояние до этой галактики¹⁾. Расположив данные о скорости и расстоянии до галактик на диаграмме (по горизонтальной оси диаграммы — расстояние до какой-либо галактики,

¹⁾ Хотя сейчас по скорости внегалактического объекта можно определить расстояние до него, причем в случае больших скоростей это будет довольно точное определение, установление закона Хаббла требовало как измерения его скорости, так и измерения расстояния до него.

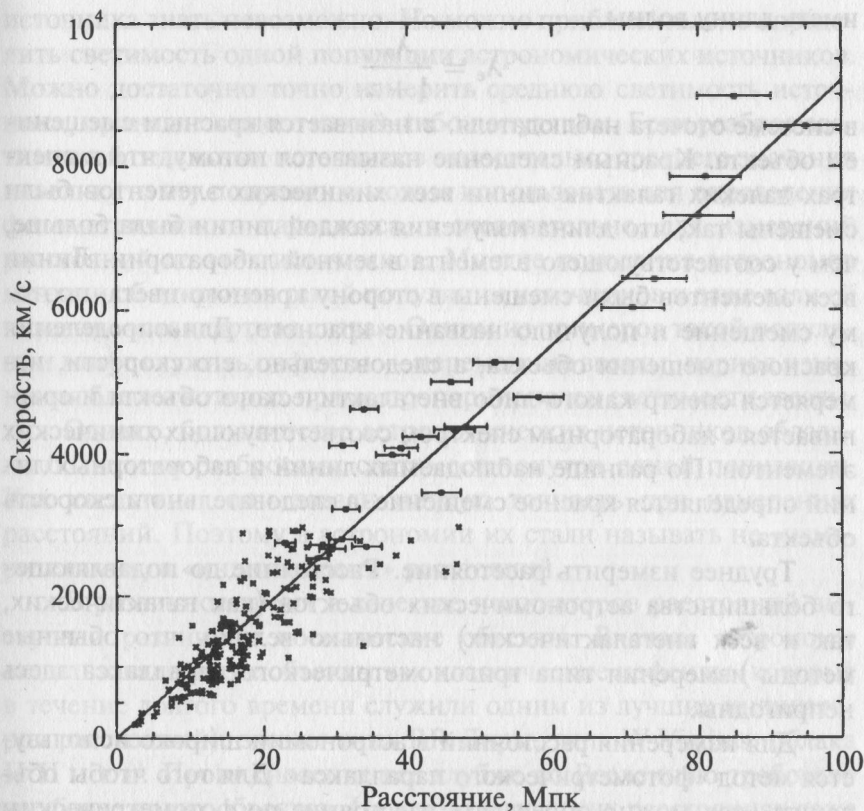


Рис. 2.1. Диаграмма Хаббла, построенная для выборки галактик по методу Тулли—Фишера. По вертикальной оси отложена скорость удаления галактики в тысячах километров в секунду, по горизонтальной — расстояние в десятках мегапарсек

по вертикальной оси — ее скорость (см. рис. 2.1)), Э. Хаббл обнаружил хорошую корреляцию «скорость—расстояние». Средняя линия, показывающая, как связаны скорость далекой галактики в зависимости от расстояния до нее, теперь называется постоянной Хаббла. Эта зависимость показала, что чем дальше галактика, тем быстрее она удаляется от нас.

Измерять скорость в астрономии просто — по эффекту Доплера. Излучение с длиной волны λ_e от небесного объекта, который удаляется от наблюдателя со скоростью $v = zc$, будет

иметь длину волны

$$\lambda_e = \frac{\lambda_o}{1 + z}$$

в системе отсчета наблюдателя. z называется красным смещением объекта. Красным смещение называется потому, что в спектрах далеких галактик линии **всех** химических элементов были смещены так, что длина излучения каждой линии была больше, чем у соответствующего элемента в земной лаборатории. Линии всех элементов были смещены в сторону красного цвета, поэтому смещение и получило название красного. Для определения красного смещения объекта, а следовательно, его скорости, измеряется спектр какого-либо внегалактического объекта и сравнивается с лабораторным спектром соответствующих химических элементов. По разнице наблюдаемых линий и лабораторных линий определяется красное смещение, а следовательно и скорость объекта.

Труднее измерить расстояние. Расстояние до подавляющего большинства астрономических объектов (как галактических, так и всех внегалактических) настолько велико, что обычные методы измерения типа тригонометрического параллакса здесь непригодны.

Для измерения расстояний в астрономии широко используется метод «фотометрического параллакса». Для того чтобы объяснить, как можно определять расстояние по фотометрическим наблюдениям, придется напомнить читателю основные понятия оптики. Источник света излучает фотоны, мощность источника в оптике называется его светимостью. Она измеряется в ваттах. Каждый знает, чем дальше от источника света, тем слабее его яркость. Фотометрические инструменты (как и глаз человека!) измеряют не мощность источника, а поток фотонов в том месте, где расположен инструмент. Поток обратно пропорционален квадрату расстояния от источника. Значит, если наблюдатель знает светимость источника и может измерить поток света от него, он может вычислить расстояние до источника света. Этот метод и носит в астрономии название «фотометрического параллакса». Для измерения фотометрического параллакса необходимо знать светимость астрономических источников. Светимость каждого

источника знать невозможно. Но можно приблизительно определить светимость одной популяции астрономических источников. Можно достаточно точно измерить среднюю светимость источника, принадлежащего какой-либо популяции. Если разброс светимостей отдельных источников относительно среднего значения невелик, то эту популяцию можно использовать для определения фотометрического параллакса, а следовательно, для измерений расстояний до этих источников. Многие поколения астрономов мечтали об открытии такой популяции источников и даже дали ей название «стандартная свеча». Одним из примеров такой популяции могут служить цефеиды — переменные звезды, период изменения блеска которых прямо пропорционален светимости звезды.

Однако, большинство астрономических источников обладали большими разбросами светимости внутри одной популяции. Как следствие, они давали низкую точность при измерениях расстояний. Поэтому в астрономии их стали называть не «измерителями», а «индикаторами» расстояний.

В различное время в качестве индикаторов расстояний выступали различные космические объекты. Вначале астрономы использовали такие объекты как классические цефеиды (которые в течение долгого времени служили одним из лучших индикаторов расстояний), звезды типа RR Лиры, типа W Virginis, облака H II и т. п. Проникновение все глубже во Вселенную требовало все более ярких объектов. На космологических расстояниях даже галактики дают мало света. Читатели, желающие более подробно узнать об астрономии и ее проблемах, могут ознакомиться с прекрасными книгами [4, 8, 10].

Построение хаббловских диаграмм, связывающих красное смещение объекта (эквивалент скорости) и расстояние до объекта, до сих пор является одним из важнейших тестов наблюдательной космологии. Оно позволяет не только определить постоянную Хаббла, но и геометрию нашей Вселенной.

Последнее время в качестве самого лучшего индикатора расстояний использовалось измерение поверхностной яркости галактик методом Тулли—Фишера. На рис. 2.1 представлена хаббловская диаграмма построенная по методу астрономов Тулли и Фишера. Наклон прямой является постоянной Хаббла.

Буквально в последние годы был найден источник, который может рассматриваться как «стандартная свеча». Это сверхновые звезды (SN) типа Ia. Такая звезда имеет высокую светимость, иногда сравнимую со светимостью всей галактики, в которой она вспыхивает [10]. Сверхновые звезды поэтому хорошо видны на межгалактических расстояниях. Звезды типа SN Ia обладают очень хорошей однородностью светимости в максимуме блеска. Разброс (или, как говорят астрономы, дисперсия) светимости в максимуме блеска для этой выборки звезд составляет $\delta m \approx 0,3-0,5^m$ звездной величины. Это очень мало, для прежних индикаторов расстояний эта величина была в несколько раз больше. Поскольку звездная величина — логарифмическая характеристика светимости, то поток энергии от прежних индикаторов расстояний различался в десятки раз, что и вызывало большую неопределенность в определении расстояний. Теперь такая неопределенность сведена к минимуму. Ввиду важности полученных результатов и чувствительности метода опишем его подробнее.

Источник типа «стандартная свеча» представляет из себя источник с известной светимостью. Так, для сверхновых типа Ia, по спектру и кривой блеска (поскольку сверхновые звезды являются нестационарными источниками блеска, то существует зависимость светимости источника от времени, которая и называется кривой блеска) можно определить светимость этой звезды. Поток светового излучения, как известно из курса школьной физики, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Измеряя на Земле блеск сверхновой, вспыхнувшей, скажем, в далекой галактике, и сравнивая его со светимостью, можно определить расстояние до объекта.

Если источник обладает большой дисперсией светимости, то он непригоден для использования в качестве индикатора расстояний. SN Ia в этом отношении уникальны. При учете тонких деталей спектра вспышки, а также при учете светимости не только в видимом, но и в ультрафиолетовом диапазоне, дисперсия светимости в максимуме блеска может быть уменьшена вплоть до $\delta m \approx 0,15^m$. Хорошая однородность этой популяции звезд, а также их большая светимость в максимуме блеска, сравнимая со

светимостью целой галактики, делают эту популяцию звезд идеальным индикатором для определения расстояния в космологии.

Сейчас несколько групп астрономов активно ведут исследования сверхновых звезд типа Ia. Основная задача этих исследований заключается в том, чтобы наблюдать как можно больше событий — вспышек сверхновых звезд, что позволит точно определить параметры Вселенной. Зарегистрировано много вспышек SN Ia, происшедших сравнительно близко к нам ($z \approx 0,1$). Вспышек в далеких галактиках, находящихся при $z \sim 1$, пока известно недостаточно. Вспышки SN Ia в далеких галактиках особенно важны, поскольку позволят не только определить постоянную Хаббла, но и измерить параметр плотности Вселенной, а именно ее геометрию.

Предварительные результаты этих исследований можно суммировать таким образом. Для обработки в качестве космологи-

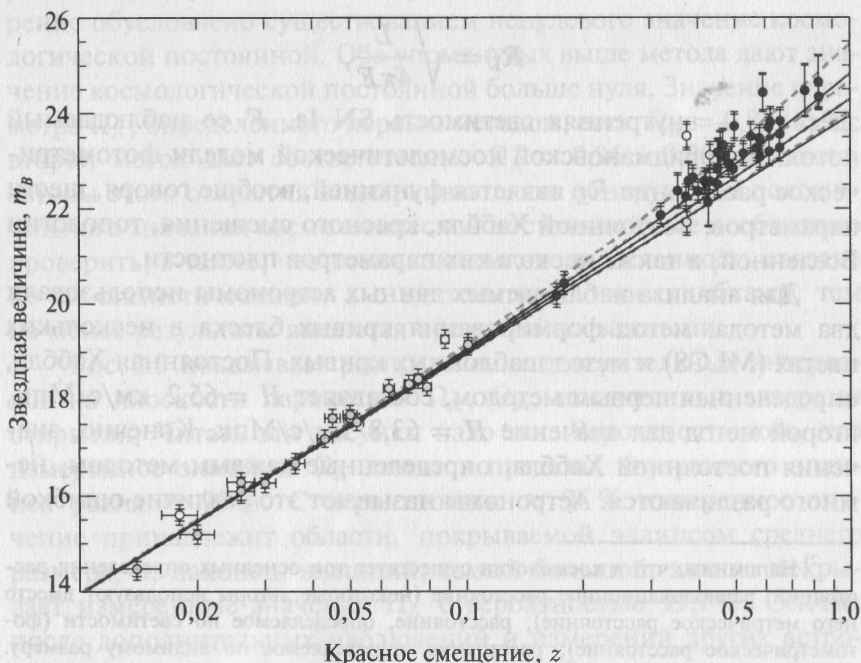


Рис. 2.2. Диаграмма Хаббла, построенная по 42 сверхновым звездам типа Ia

ческих индикаторов расстояний сейчас отобрано примерно 100 событий — вспышек сверхновых звезд в галактиках. На рис. 2.2 показано распределение измерений параметров сверхновых звезд отложенных на диаграмме Хаббла.

Группа астрономов, совершивших это открытие, при анализе использовала примерно 30 вспышек, которые находятся близко к нам (по космологическим масштабам), при $z < 0,15$ (напомним, что это соответствует расстоянию до них порядка 1 гигапарсека). Дополнительные события, расположенные при больших значениях красного смещения $0,35 < z < 0,55$ (общее число таких далеких событий составляет 16 вспышек), используются для фиксации прямой при больших значениях z . Наблюдалась также одна вспышка с красным смещением 0,62 и одна с красным смещением 0,97.

Формула для расстояния, определяемого по анализу вспышек, называется уравнением фотометрического расстояния ²⁾.

$$R_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}},$$

здесь L — внутренняя светимость SN Ia, F ее наблюдаемый поток. Во фридмановской космологической модели фотометрическое расстояние R_L является функцией, вообще говоря, шести параметров: постоянной Хаббла, красного смещения, топологии Вселенной, а также нескольких параметров плотности.

Для анализа наблюдаемых данных астрономы использовали два метода: метод формирования кривых блеска в нескольких цветах (MLCS) и метод шаблонных кривых. Постоянная Хаббла, определенная первым методом, составляет $H = 65,2$ км/с/Мпк, второй метод дал значение $H = 63,8$ км/с/Мпк. Конечно, значения постоянной Хаббла, определенные каждым методом, немного различаются. Астрономы называют это различие ошибкой

²⁾ Напомним, что в космологии существует три основных определения расстояний: радиолокационное расстояние (некоторые авторы используют вместо него метрическое расстояние); расстояние, определяемое по светимости (фотометрическое расстояние); расстояние, определяемое по видимому размеру. В отличие от евклидовой геометрии все три расстояния определяются разными уравнениями.

метода и говорят, что H измерена с некоторой неопределенностью. Неопределенность постоянной Хаббла сейчас, однако, составляет небольшую часть средней величины, и наиболее реалистическое значение постоянной Хаббла по сверхновым звездам есть $H = 65 \pm 7$ км/с/Мпк. Эта запись означает, что H не меньше 58 км/с/Мпк и не больше чем 72 км/с/Мпк.

Главный вывод наблюдений вспышек далеких сверхновых звезд и измерений их характеристик связан не со значением параметра Хаббла, а с измерением параметра ускорения нашей Вселенной. Авторы (А. Филиппенко, А. Рейсс, С. Перлмуттер, П. Чаллис) утверждают, что их измерения свидетельствуют об ускоренном расширении нашей Вселенной. Итак, после открытия в 1929 г. расширения нашего мира, т. е. измерения удельной скорости расширения — параметра Хаббла, в 1998 г. впервые достоверно измерена следующая кинематическая величина — удельное ускорение нашего мира. Астрономы полагают, что ускорение обусловлено существованием ненулевого значения космологической постоянной. Оба упомянутых выше метода дают значение космологической постоянной больше нуля. Значение параметра Ω_Λ , определенного первым методом, есть: $\Omega_\Lambda = 0,80 \pm 0,22$; второй метод дает соответственно $\Omega_\Lambda = 0,96 \pm 0,20$. Конечно, авторы этого открытия подчеркивают, что обнаружение положительного значения космологической постоянной еще необходимо проверить, а также, что возникающая неопределенность связана не со статистическими, а с систематическими ошибками, тем не менее результаты являются чрезвычайно важными.

Рис. 2.3 показывает распределение доверительных интервалов на плоскости параметров Ω_Λ , Ω_m , посчитанных авторами открытия. Читать эти рисунки надо так. Вероятность того, что измеренное значение Ω_Λ лежит в пределах внутреннего эллипса равна $\approx 70\%$. С вероятностью $\approx 96\%$ измеренное значение принадлежит области, покрываемой эллипсом среднего размера, и, наконец, внешний, самый большой, эллипс покрывает измеренные значения Ω_Λ с вероятностью 99,7%. Сейчас, после дополнительных наблюдений и измерений других астрономов и накопления дополнительных наблюдательных данных, эллипсы, показывающие вероятность измерений, стали занимать

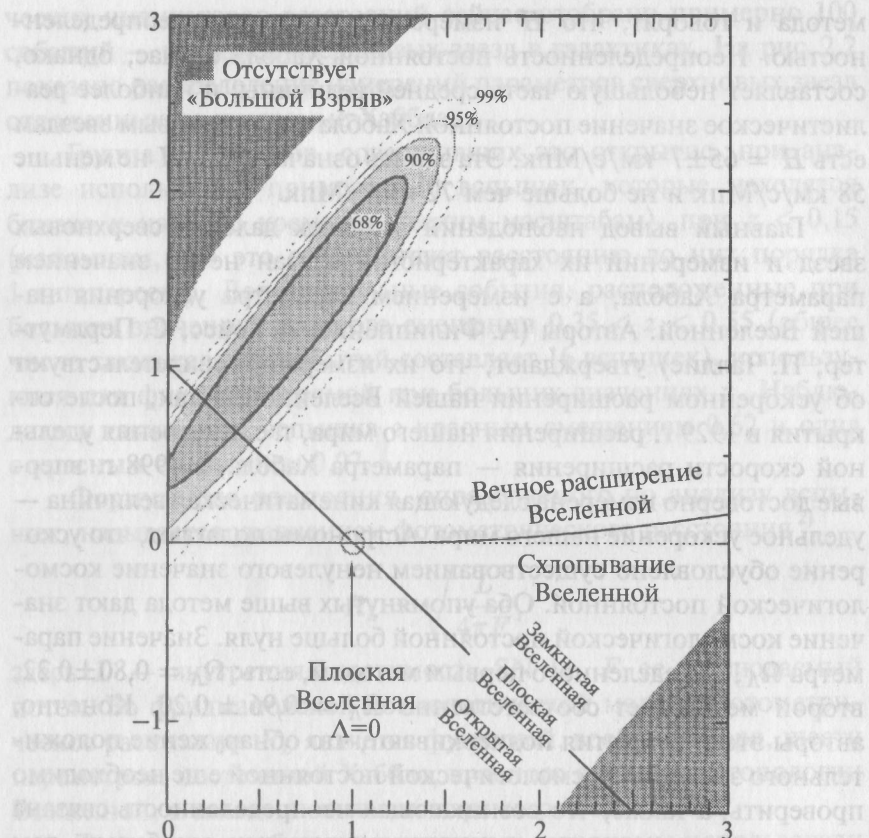


Рис. 2.3. Диаграмма значений параметра Ω . По вертикальной оси отложено значение параметра Ω_Λ , по горизонтальной Ω_m . Эллипсы, слегка наклоненные к осям, означают доверительные интервалы. Так, внутри одного из эллипсов находятся значения как Ω_Λ , так и Ω_m

меньше места на этой диаграмме. Вероятность того, что Ω_Λ больше нуля, составляет теперь 99 %. Это означает, что данные об ускоренном расширении нашей Вселенной подтверждаются.

Сейчас это открытие независимо подтверждено еще двумя группами исследователей. Поэтому астрономы начинают анализировать следствия этих наблюдений для космологии. Мы еще вернемся к этой проблеме в книге и обсудим следствия этого факта.

Реликтовое излучение

До середины шестидесятых годов XX века в основании космологии фактически лежал только один наблюдательный тест: расширение нашей Вселенной, разбегание галактик, описанное в предыдущем параграфе.

Ситуация изменилась в 1965 году после открытия реликтового излучения. Существование реликтового излучения по праву можно считать вторым из основных тестов, лежащих в основании современной космологии³⁾.

Реликтовое излучение предсказал Г. Гамов. Интересна судьба этого человека, много замечательных научных результатов было получено им. История его жизни сравнительно недавно еще была под запретом, теперь читатель может ознакомиться со многими его популярными книгами, прочитать автобиографию, изданную в России [2].

Для нас сейчас важно лишь предсказанное им реликтовое излучение. Теорию, созданную Г. Гамовым, часто называют теорией «Большого Взрыва». В 50-х годах XX века он предложил идею горячей Вселенной, применив в космологии идеи ядерной физики и термодинамики. В горячем и плотном веществе ранней Вселенной происходили термоядерные реакции, которые обеспечили обилие легких космических элементов, наблюдаемых сегодня. Одним из результатов этой теории было предсказание реликтового излучения. Сам Гамов вычислил его характеристики, в частности, определил его температуру. Поскольку к моменту создания работы большинство сечений термоядерных реакций еще были секретными величинами, то Гамов получил результат,

³⁾ Следует упомянуть, что оно называется реликтовым излучением в русскоязычной литературе. Этот термин, придуманный замечательным советским астрофизиком И. С. Шкловским, хорошо отражает смысл. Это излучение является свидетелем далеких эпох в развитии нашей Вселенной, так же как динозавры, доживи они до наших дней, были бы для нас живыми свидетелями далеких эпох в развитии животного мира нашей Земли. В англоязычной литературе больше используется тяжеловесный термин the CMBR, являющийся аббревиатурой целого предложения «космическое микроволновое фоновое излучение».

примерно в два раза расходящийся с измеренным; температура в его вычислениях равнялась 6 К.

Реликтовое излучение «открывали» несколько раз. Так, наш соотечественник Т. А. Шмаонов в 1956 г. обнаружил излучение, распределение яркости которого по небу не зависело от зенитного угла. Однако никто не обратил внимание на это сообщение. В 1964 г. А. Г. Дорошкевич и И. Д. Новиков вычислили диапазон волн, в котором яркость реликтового излучения должна значительно превосходить яркость других небесных источников, а следовательно, искать его следы нужно именно в этом диапазоне. Опять радиоастрономы не обратили внимание на статью двух молодых теоретиков.

Реликтовое излучение было открыто А. Пензиасом и Р. Вильсоном в 1965 г. Эти двое ученых не были радиоастрономами; они работали радиоинженерами в корпорации «Белл». Они создали новый радиометр для целей связи. При испытаниях этого радиометра они обнаружили некоторый шум, избыточный по сравнению с техническим заданием. Внимательно исследовав радиометр, они сделали вывод, что избыточный шум связан с неотожествленным космическим излучением. Удивительное свойство этого излучения заключалось в том, что его мощность не зависела от направления на небесный свод. Здесь следует упомянуть, что до этого момента все источники космического излучения отождествлялись с определенными космическими объектами (Солнцем, Луной, Юпитером, т. е. лежали в плоскости эклиптики) или галактическими источниками, которые находились в плоскости Галактики. Известные к тому времени внегалактические источники тоже отождествлялись с далекими галактиками или квазарами.

А. Пензиас и Р. Вильсон написали статью об открытии нового источника излучения и направили ее в журнал. К тому времени профессор Р. Дикке из Принстонского университета уже готовил специальную аппаратуру для поиска реликтового излучения. Статья попала к нему на рецензию, он мгновенно оценил ее, дал положительную рецензию для опубликования, и сам написал короткую заметку, содержащую интерпретацию полученных результатов. Так состоялось открытие реликтового

излучения. За эту работу А. Пензиас и Р. Вильсон были удостоены Нобелевской премии за 1978 г.

За прошедшие тридцать лет исследования реликтового излучения проводились неоднократно. Сейчас лучшее измерение его температуры, выполненное космическим аппаратом «COBE», составляет 2,725 К.

Крупномасштабная структура Вселенной

Третьим основным наблюдательным фактом, лежащим в фундаменте современной космологии, следует считать открытие и исследование крупномасштабной структуры Вселенной. До этого открытия самыми крупными объектами во Вселенной считались гигантские галактики и скопления галактик. Открытия сверхскоплений галактик (крупномасштабной структуры) произвело неизгладимое впечатление на подавляющее большинство космологов.

Крупномасштабная структура Вселенной была предсказана в работах выдающегося советского ученого, академика Я. Б. Зельдовича. Анализируя законы эволюции малых возмущений плотности в расширяющейся Вселенной, Яков Борисович обнаружил любопытное явление: образующиеся объекты не обладали сферической формой. Они представляли из себя трехмерные структуры с тремя неравными поперечными размерами. Такие структуры больше походили на блины. Он назвал эту теорию теорией блинов. Предсказание было блестяще подтверждено наблюдениями!

Вернемся в 1981 г. Автор книги, тогда еще молодой научный сотрудник Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга (ГАИШ) МГУ, с удовольствием посещал все научные конференции по физике и астрономии, проходившие в Москве, благо конференций хватало. Одна из самых престижных конференций раз в два года организовывалась Институтом ядерных исследований АН СССР под руководством М. А. Маркова и Я. Б. Зельдовича. Название этих регулярных конференций было «Квантовая гравитация», и на них выступали знаменитые ученые: Я. Б. Зельдович, М. А. Марков, С. Хокинг,

А. Д. Сахаров (последний стал посещать эти конференции после своего возвращения в Москву в 1989 г.). Знаменитых специалистов было так много, что при перечислении немудрено кого-либо пропустить. Выступали на этих конференциях молодые блестящие ученые А. Линде, В. Рубаков, А. Старобинский, С. Шандарин, М. Хлопов и другие.

Конференция 1981 г. проводилась в московском Доме Ученых. Мы, молодые научные сотрудники, между заседаниями с удовольствием посещали буфет этого дома, даже там ведя беседы на научные и околonaучные темы. Во время одного из таких перерывов к нам обратилась Н. Морозова — сотрудница одного из научных московских издательств — с вопросом прокомментировать утреннее радиосообщение об открытии гигантских черных дыр в космосе размером в сотни мегапарсек. Первая реакция была сугубо отрицательная — чушь! Дело в том, что термин «черная дыра» в астрофизике зарезервирован для объектов вполне определенной природы, обладающих предельным гравитационным полем. К счастью, рядом с нами находился один из учеников Я. Б. Зельдовича — Сергей Шандарин, который сразу же прокомментировал это сообщение. Речь в нем шла об открытии гигантских пустот в космосе, а не черных дыр. С. Шандарин занимался теорией крупномасштабной структуры Вселенной под руководством Я. Б. Зельдовича и детально рассказал нам об этом открытии. Сейчас для таких пустот как в английском, так и в русском языке существует один термин — «войд» (пустота); это английский термин, вошедший в русскоязычную научную литературу.

Вселенная однородна и изотропна на очень больших масштабах. Переход от неравномерного распределения вещества к однородному распределению, грубо говоря, к масштабам, на которых контраст плотности уже значительно меньше единицы, осуществляется начиная с масштаба примерно 200 Мпк. Так, если усреднить плотность Вселенной внутри куба с ребром 200 Мпк и передвинуть этот куб с одного места на другое (конечно, две области, разделенные расстоянием больше, чем 200 Мпк), то средняя плотность в первом месте будет почти равна средней плотности второго места. В меньших масштабах Вселенная обладает значительной неоднородностью. Так, контраст плот-

ности внутри нашей Галактики (размеры меньше, чем 1 Мпк) превышает единицу.

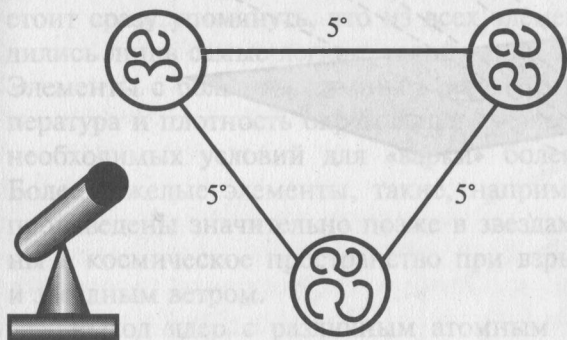


Рис. 2.4. На рисунке показана схема эксперимента Киршнера и его коллег. Небольшой телескоп астрономы использовали для того, чтобы сфотографировать все галактики в трех избранных областях неба. Эти области отстояли друг от друга на расстоянии 5°

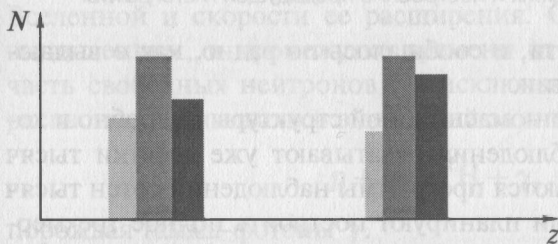


Рис. 2.5. Гистограмма, поясняющая открытие крупномасштабной структуры в распределении галактик

Киршнер и его коллеги — астрономы, которые открыли крупномасштабную структуру, — наблюдали далекие галактики в телескоп. Они выбрали три поля галактик, отстоящие друг от друга на угловом расстоянии 5° , как показано на рис. 2.4, в каждом из полей они сосчитали галактики и измерили их красные смещения. Красное смещение эквивалентно расстоянию до галактики, поэтому исследователи построили гистограмму: число галактик N — красное смещение z , рис. 2.5. На гистограмме были ясно видны два пика, разделенные почти пустым пространством. Интерпретация этих наблюдений очень проста: лучи телескопа «прошли» два блина крупномасштабной структуры Вселенной. На рис. 2.6 изображены два «блина», содержащие тысячи галактик. Именно о пустом поле, содержащемся между

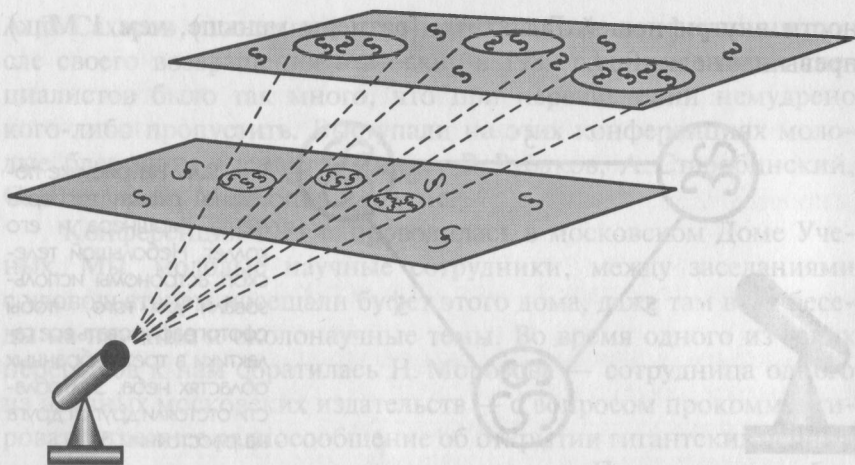


Рис. 2.6. Рисунок, поясняющий открытие крупномасштабной структуры в распределении галактик и построение предыдущей гистограммы

двумя пиками плотности, и сообщалось по радио, как о выдающемся научном открытии.

Сейчас теория крупномасштабной структуры подробно и хорошо разработана, наблюдения охватывают уже десятки тысяч галактик, подготавливаются программы наблюдений сотен тысяч галактик. Исследователи планируют построить полное трехмерное распределение галактик во Вселенной на глубину, превышающую сотню мегапарсек.

Распространенность легких элементов

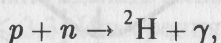
Четвертый основной наблюдательный тест — распространенность легких химических элементов в космосе.

Период от 1 с до 200 с от начала расширения играет большую роль в нашей Вселенной. В то время она была значительно меньше и горячее, точнее сказать, вся Вселенная представляла из себя один сверхбольшой термоядерный реактор. Вещество представляет из себя горячую плазму⁴⁾ с температурой частиц

⁴⁾ Иногда плазму называют четвертым состоянием вещества; напомним, что три состояния вещества в физике — это твердое, жидкое и газообразное.

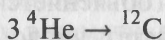
несколько миллиардов градусов. В этом «реакторе» из первичного водорода «варились» другие легкие элементы. Это было время, когда начинает рождаться привычное нам вещество. Правда, стоит сразу упомянуть, что из всех элементов в тот период родились лишь самые легкие: гелий и литий, а также их изотопы. Элементы с большим атомным весом тогда не рождались; температура и плотность окружающего вещества не смогли создать необходимых условий для «варки» более тяжелых элементов. Более тяжелые элементы, такие, например, как железо, были произведены значительно позже в звездах; они были выброшены в космическое пространство при взрывах сверхновых звезд и звездным ветром.

Выход ядер с различным атомным весом сильно зависит от нескольких физических параметров: $\frac{n}{p}$ — отношения числа первичных нейтронов к числу первичных протонов, от плотности Вселенной и скорости ее расширения. Согласно современным вычислениям, в промежутке времени от 1 с до 100 с большая часть свободных нейтронов (за исключением тех, что успевали распасться) связывалась в дейтерий за счет реакции



порождая гамма-фотоны γ .

Дейтерий, в свою очередь, захватывал барионы первичной плазмы и рождал изотоп гелия ${}^3\text{He}$ и тритий. С захватом еще одного нейтрона образовывался другой изотоп гелия ${}^4\text{He}$, в котором практически все нераспавшиеся нейтроны заканчивали свой путь. Отсутствие подходящих ядер с числом $A = 5$ останавливало дальнейшие реакции, а из-за малой плотности вещества реакции типа



практически отсутствовали.

Относительный (по массе) выход ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ${}^2\text{H}$ и ${}^7\text{Li}$ в зависимости от плотности барионов Ω_b (Ω_b — средняя плотность барионов по отношению к критической плотности, подробнее в главе 4) показан на рис. 2.7. Уменьшение выхода

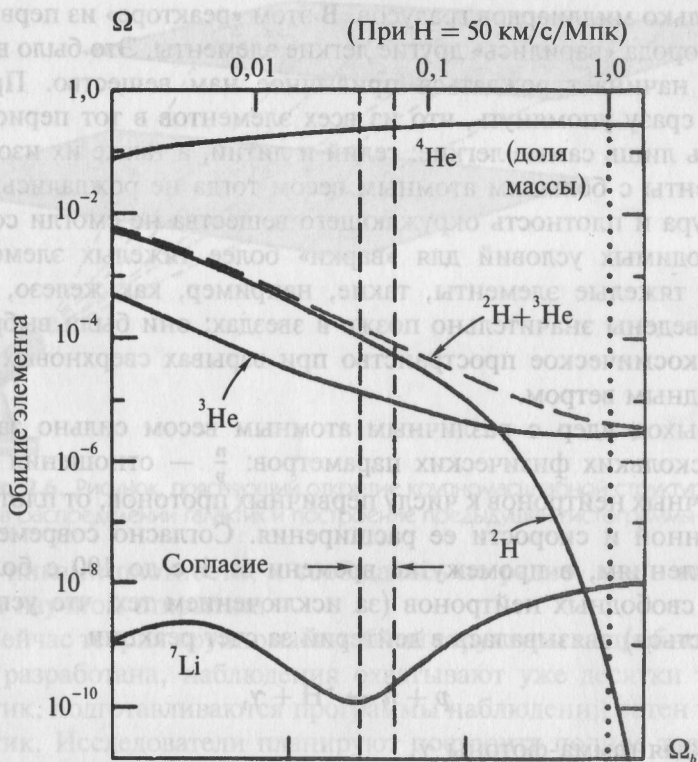


Рис. 2.7. Расчетные весовые концентрации легких элементов, образовавшихся при первичном нуклеосинтезе. Область внутри вертикальных штриховых линий — допускаемое наблюдениями значение плотности барионов Ω_b . Сплошные кривые — теоретически вычисленные обилия различных элементов в зависимости от Ω_b . Из рисунка видно, что количество ^4He практически не зависит от этого параметра. Наиболее жесткие определения величины Ω_b получаются по обилию ^2H и особенно лития ^7Li , показывающие очень сильную зависимость от Ω_b .

дейтерия с ростом Ω_b объясняется тем, что при увеличении плотности барионов растет число столкновений между ними и, соответственно, возрастает вероятность образования тяжелых ядер. В силу сказанного, количество дейтерия во Вселенной является чувствительным индикатором плотности барионной составляющей. Другим таким индикатором является количество ^7Li .

Из сравнения численного расчета с наблюдениями обилия элементов можно сделать заключение о плотности барионов:

$$\Omega_b = 0,05 \pm 0,03.$$

Предсказание количества водорода H (75 %) и гелия (${}^4\text{He} \sim 25\%$), а также остальных легких элементов, достаточно хорошо согласующееся с наблюдениями, является основным результатом теории нуклеосинтеза, а предсказание плотности барионов во Вселенной — основным побочным продуктом этой теории.

Необходимо также отметить, что наряду с впечатляющими совпадениями теоретических предсказаний обилия легких элементов с измеренными значениями существуют некоторые нетривиальные выводы об элементарных частицах. В частности, из теории нуклеосинтеза получается ограничение на общее число различных типов нейтрино; идея этого ограничения принадлежит безвременно ушедшему от нас советскому ученому В. Шварцману. Сейчас известны три типа нейтрино: электронное нейтрино ν_e , мюонное нейтрино ν_μ и тау-нейтрино ν_τ . Поскольку обилие легких элементов зависит от числа нейтрино, то на основании наблюдаемого обилия можно сделать вывод, что число типов нейтрино во Вселенной $N_\nu \leq 3,3$. Измерения числа типов нейтрино, проведенные специалистами современной физики ускорителей, показывают, что число нейтрино есть $N_\nu = 2,98 \pm 0,05$.

Анизотропия реликтового излучения

Открытие анизотропии реликтового излучения, несомненно, следует отнести к пятому из основных экспериментальных тестов современной космологии. Это открытие было сделано менее десяти лет назад. Поскольку автор сам был участником работ, связанных с наблюдением анизотропии реликтового излучения, и события тех дней еще свежи в памяти, то при рассказе в главе, посвященной анизотропии реликтового излучения, будет уделяться внимание не только чисто научным фактам, но также и тем фактам, которые обычно ускользают при опубликовании работ.

Анизотропия — это разница температуры реликтового излучения в различных направлениях на небе. Реликтовые фотоны

идут к нам со всех направлений небесной сферы. Поэтому адекватный математический аппарат для анализа углового распределения реликтового излучения — разложение по сферическим функциям или по мультипольным гармоникам. Результаты исследований представляются в виде графиков, на которых отложены амплитуды измеренных гармоник в угловом спектре анизотропии реликтового излучения.

Каждый шаг в исследовании реликтового излучения требовал больших усилий экспериментаторов. Однако, необходимо отметить, что каждый шаг приводил к важным физическим открытиям и был важным концептуальным выбором в космологии в целом. Открытие реликтового излучения или наблюдение первой мультипольной гармоники — монопольной — подтвердило теорию горячей Вселенной. Сейчас оно является решающим аргументом теории Большого Взрыва в целом. Следующий шаг — открытие дипольной гармоники — потребовал увеличения чувствительности радиометров в 1 000 раз! Амплитуда этой гармоники составляет всего 3 *mK*. Ее измерение позволило установить наиболее универсальную систему отчета, определить случайные скорости галактик и т. п. Поиск крупномасштабной анизотропии (современное значение амплитуды флуктуаций $\sim 30 \mu K$) вновь потребовало увеличения чувствительности приборов в 100 раз. Вскоре после открытия крупномасштабной анизотропии (на спутниках «Реликт» и «COBE») была открыта анизотропия в средних угловых масштабах.

Современное состояние исследований таково, что позволяет специалистам уверенно говорить об обнаружении анизотропии в крупных и средних угловых масштабах, а также о предварительном измерении амплитуды и положения доплеровского пика в угловом спектре анизотропии. Следующий естественный шаг — измерение поляризации реликтового излучения — вновь потребует большого увеличения чувствительности измерений.

Гравитационные линзы

Наконец мы подошли к последнему космологическому тесту — гравитационным линзам. Исследования гравитационных

линз лежат на стыке внегалактической астрономии и космологии. Хотя большую часть выводов, полученных от исследования гравитационных линз, астрономы используют для изучения галактик, влияние этих исследований для космологии очень велико. Исследование скрытой массы нашей Вселенной, возможность измерения основных глобальных параметров, определяющих ее геометрию, — вот неполный список вопросов, на которые можно найти ответ при изучении гравитационных линз.

Экспериментальное исследование внегалактических гравитационных линз началось в 1979 г., когда английские исследователи Волш, Карсвелл и Вейман объявили об открытии так называемого двойного квазара⁵⁾. Квазар Q0957 + 561 A,B на фотографии выглядел как два квазара, разделенных угловым расстоянием 6". Астрономы обнаружили, что оба квазара имеют одинаковое красное смещение $z \approx 1,4$, а также одинаковые спектры. Почти сразу двойной квазар был отождествлен с понятием гравитационной линзы. Явление или отсутствие гравитационной линзы прямым образом зависит от расположения звезд, точнее говоря, галактик и квазаров. Этот феномен возникает только в том случае, когда угловое расстояние между небесными объектами не превышает так называемого конуса Эйнштейна, размер которого для внегалактических линз составляет примерно 1", а для галактических микролинз составляет порядка 1 миллисекунды дуги. Естественно, такое тесное соседство на небесном своде — явление редкое. Открытие его стало возможно только после создания больших телескопов, обладающих огромной проникающей силой. При равномерном распределении небесных объектов в пространстве, чем дальше от нас некоторый небесный источник, тем слабее его свет, но угловое расстояние между далекими источниками меньше, а сами источники расположены теснее. Вероятность находиться на небольшом угловом расстоянии больше для далеких и, следовательно, более слабых источников.

Следует сказать, что явление гравитационной линзы — предмет особой гордости астрономов-теоретиков. Это одно из неболь-

⁵⁾ Квазары были открыты в середине 60-х годов Мартином Шмидтом; они являются одними из самых ярких и далеких объектов Вселенной.

шого числа явлений в классической астрономии, которое было предсказано теоретиками задолго до открытия. Они полагали также, что гравитационные линзы станут источником важной информации о космологии, о геометрии Вселенной, о скорости ее расширения, о плотности скрытого вещества как во Вселенной в целом, так и в отдельных объектах — например, в скоплениях галактик и в галактиках.

За прошедшие двадцать лет были открыто много внегалактических линз. Общий список линз превышает два десятка объектов⁶⁾. Среди гравитационных линз есть интересные объекты с точки зрения космологии. Существуют линзы, содержащие несколько точечных неразрешенных изображений, линзы в виде почти замкнутых дуг (кольца Эйнштейна), линзы в виде коротких дуг (арки и арклеты).

Одно из самых интересных открытий в области изучения гравитационных линз было сделано в начале последнего десятилетия двадцатого века. Это открытие микролинзирования в нашей Галактике.

Российский физик А. Б. Бялко в 1969 г. и американский астроном Б. Пачинский на основании анализа кривой вращения нашей Галактики в 1986 г. высказали гипотезу, что ее сферическая подсистема может быть заполнена невидимыми (несветящимися) телами, нейтронными звездами, слабосветящимися карликовыми звездами (так называемыми коричневыми карликами) и т. п., вплоть до тел с массой Юпитера («юпитерами»). Они также вычислили вероятность эффекта микролинзирования на таких телах. Эта вероятность оказалась достаточно большой, чтобы наблюдать эффект микролинзирования. Таким образом, была получена возможность наблюдения гравитационного поля отдельных темных тел гало и, вообще говоря, изучения их пространственного распределения.

⁶⁾ Количество объектов в этом списке зависит от наличия признаков, которые различные исследователи считают необходимым свойством линзы. Одинаковые красные смещения и идентичные спектры изображений являются необходимым, но иногда недостаточным свойством для причисления объекта к списку гравитационных линз.

Поиску темной материи в форме невидимых тел, заполняющих гало нашей Галактики, были посвящены несколько наблюдательных программ. В конце 1993 года две группы исследователей сообщили результаты поиска массивных невидимых тел в гало нашей Галактики по эффекту микролинзирования, т. е. по эффекту изменения блеска фоновых звезд.

Американо-австралийская группа МАСНО (аббревиатура английской фразы MAssive Compact Halo Objects) искала эффект микролинзирования на фоне Большого Магелланового Облака (БМО), наблюдая 1,8 млн звезд в течение одного года. В феврале–марте 1993 года астрономы обнаружили, что одна из звезд с координатами $\alpha = 05^h 14^m 44,5^s$ и $\delta = -68^\circ 48' 00''$ стала ярче в 6,8 раза, а затем в течение 34 дней ее блеск вернулся к прежнему уровню.

Астрономы использовали 1,27 метровый телескоп австралийской обсерватории Маунт Стромло. В фокусе этого телескопа помещался дихроичный делитель светового пучка, который позволял одновременно наблюдать звезды в красном (6 300–7 600 Å) и голубом (4 500–6 300 Å) цветах. В качестве приемника света группа МАСНО использовала две большие ПЗС камеры (ПЗС — сокращение от Прибор с Зарядовой Связью).

Французские астрономы (группа EROS, аббревиатура французской фразы Experience de Recherches d'Objects Sombres) наблюдали 3 млн звезд в БМО в течение трех лет. В 1993 году они также сообщили о микролинзовых событиях. Одна из звезд повысила свой блеск в 2,5 раза с характерной длительностью 54 дня, а вторая в 3,3 раза с характерной длительностью 60 дней.

Третьей группой, сообщившей о наблюдении микролинзовых событий, но не в направлении БМО, а в направлении на центр нашей Галактики, была польская группа OGLE. Сейчас известна, по крайней мере, сотня микролинзовых событий. Большинство этих событий наблюдалось в направлении на центр нашей Галактики.

Различные эпохи нашей Вселенной

Всю историю Вселенной принято подразделять на эпохи. Только их названия означают не привычный нам исторический, а физический смысл происходящего. Космология — одна из немногих естественных наук, в которых присутствует эволюция в явном виде. В этой главе будет дан взгляд на эволюцию Вселенной в целом и кратко описана каждая эпоха в ее развитии.

Ранняя Вселенная

Рождение Вселенной

Можно сказать, что как многие свойства характера человека закладываются в раннем детстве, так и основные свойства нашей Вселенной являются следствием «младенческой стадии» ее развития. Поэтому рассказ о Вселенной начнем с самых ранних эпох и будем последовательно передвигаться от одной эпохи к другой.

В табл. 1 указаны основные эпохи ранней Вселенной. Вначале идет эпоха рождения классического пространства-времени. Для описания этой стадии развития (или существования?) нашей Вселенной необходимо использовать понятия квантовой гравитации или понятия струнной гравитации. Квантовая гравитация является необходимым этапом в развитии теории гравитации. Однако, ее основные эффекты начинают проявляться, когда плотность вещества достигает планковской плотности (планковская плотность — $\rho_{\text{pl}} \sim 10^{93} \text{ г/см}^3$). Следует сказать, что сейчас нет ни одного эксперимента, подтверждающего квантовый характер уравнений гравитационного поля. Поэтому при описании

Таблица 3.1

Основные эпохи эволюции Вселенной

Название эпохи и физические процессы в то время	Время от Большого Взрыва	Температура
Рождение классического пространства-времени	10^{-43} с	10^{32} К
Стадия инфляции	$\sim 10^{-42} - 10^{-36}$ с	меняется в очень широких пределах*
Рождение вещества	10^{-36} с	$\sim 10^{29}$ К
Рождение барионного избытка	10^{-35} с	$\sim 10^{29}$ К
Электрослабый фазовый переход	10^{-10} с	$\sim 10^{17} - 10^{16}$ К
Конфаймент кварков	10^{-4} с	$\sim 10^{12} - 10^{13}$ К
Первичный нуклеосинтез	1–200 с	$\sim 10^9 - 10^{10}$ К
Доминирование темной материи	700 лет	300 000 К
Рекомбинация	700 000 лет	3 000 К
Современная эпоха	20 000 000 000 лет	3 К

* Температура во время стадии инфляции очень быстро падает до нуля. Стадия инфляции — это, в основном, «холодная стадия». Реальных частиц во время этой стадии практически нет. Материя представлена одним или несколькими скалярными полями.

этой стадии используются самые общие идеи о квантовой эволюции Вселенной как целого.

В настоящее время общепризнанной считается так называемая теория «Большого Взрыва» — рождения Вселенной из сингулярности (или, как иногда говорят, из пространственно-временной пены). Во время рождения температура и плотность вещества достигали планковских значений. Планковская температура

составляет $T_{\text{pl}} = 1,3 \cdot 10^{32}$ К. Начиная с этого момента Вселенная начала расширяться, температура вещества стала понижаться и объем Вселенной начал расти. Время существования этой стадии составляет несколько планковских времен $t_{\text{pl}} \sim 10^{-43}$ с.

Эпоха инфляции

Через 10^{-42} с после рождения классического пространства-времени во Вселенной наступила инфляционная стадия. Она характеризуется предельно сильным **отрицательным** давлением (его иногда называют состоянием фальшивого вакуума), при котором меняются сами законы обычной гравитационной физики. Вещество становится не источником притяжения, а источником отталкивания. Во время этой стадии объем Вселенной увеличивается на много порядков (в некоторых моделях даже на порядки порядков, скажем в 10^{10^3}), в результате чего вся современная Вселенная оказывается в одной причинно-связанной области, уравниваются кинетическая энергия расширения Вселенной и ее потенциальная энергия. Из-за действия сил отталкивания Вселенная «разгоняется» и приобретает большую кинетическую энергию, которую в дальнейшем мы наблюдаем в виде хаббловского расширения по инерции.

На стадии инфляции из вакуумных квантовых флуктуаций скалярного поля¹⁾ рождаются возмущения плотности, а из квантовых флуктуаций метрики — гравитационные волны. Вакуумные квантовые флуктуации, которые обычно проявляются только в микроскопических масштабах, в экспоненциально расширяющейся Вселенной быстро увеличивают свою длину и амплитуду и становятся космологически значимыми. Поэтому можно сказать, что скопления галактик и сами галактики являются макроскопическими проявлениями квантовых флуктуаций.

Фальшивый вакуум обладает большой плотностью потенциальной энергии, по современным оценкам она составляет 10^{98} эрг/см³. Уравнение состояния вещества с отрицательным давлением неустойчиво. Оно должно смениться обычным

¹⁾ О скалярном поле см. в главе 6.

(положительным или равным нулю) давлением. Поэтому инфляционная фаза развития Вселенной довольно быстро кончается, ее окончание происходит из-за распада состояния фальшивого вакуума. При этом вся запасенная в нем потенциальная энергия выделяется в виде рождения частиц и их кинетической (тепловой) энергии. Образуется горячая плазма, состоящая из элементарных частиц с температурой $\sim 10^{16}$ ГэВ²⁾. Другими словами, с окончанием эпохи инфляции рождается обычная материя.

Рождение избытка вещества над антивеществом

Природа взаимодействий в области энергий 10^{16} ГэВ до сих пор далека от понимания. Среди существующих моделей взаимодействий есть такие, которые предсказывают появление тяжелых лептокварков — частиц, обладающих признаками лептонов и барионов. Считается, что эти частицы могут взаимодействовать между собой таким образом, что изменяется барионное число. Изменение барионного числа означает, что может генерироваться избыток вещества над антивеществом. Эта стадия называется эпохой горячего бариосинтеза.

Рождению избытка вещества над антивеществом (бариосинтез) соответствуют энергии элементарных частиц $E \sim 10^{15}$ ГэВ (или $T \sim 10^{28}$ К). Процесс, происходящий при температуре $T \sim 10^{28}$ К, называется обычно высокотемпературным бариосинтезом, в отличие от низкотемпературного бариогенеза, который может происходить при значительно более низких температурах. Между этими двумя эпохами лежит так называемая «пустыня взаимодействий». Этот термин означает, что ничего интересного с точки зрения современной физики в эту эпоху расширения Вселенной не происходит.

Барионный заряд материи нашей Вселенной может также генерироваться, когда температура плазмы падает до 10 ТэВ³⁾.

²⁾ ГэВ — единица измерения энергии в современной физике элементарных частиц. Энергия 1 ГэВ примерно равна полной энергии, содержащейся в протоне (согласно уравнению $E = mc^2$) или одной тысячной части эрга.

³⁾ ТэВ — единица измерения энергии в физике элементарных частиц, аббревиатура слова «тераэлектронвольт», равна примерно одному эргу.

Именно эта стадия называется стадией холодного бариогенеза. Слово «может» относится к нашему незнанию, точнее говоря, к отсутствию твердо установленных экспериментальных фактов, описывающих взаимодействия элементарных частиц в районе энергий 1 ТэВ и выше, где экспериментальные данные практически полностью отсутствуют. Существующие теоретические модели указывают на такую возможность, хотя ни в одном эксперименте до сих пор не наблюдалось несохранение барионного числа.

Электрослабый фазовый переход

Чуть ниже по шкале энергий, но примерно в этом же интервале температур, происходит электрослабый фазовый переход. До этого момента электромагнитные взаимодействия и слабые взаимодействия с участием нейтрино являются единым электрослабым взаимодействием. После того, как происходит фазовый переход, бозоны — переносчики электрослабого взаимодействия — W^\pm и Z^0 ⁴⁾ становятся массивными (срабатывает механизм динамического рождения массы или механизм Хиггса), и слабое взаимодействие становится «очень слабым» и короткодействующим, поскольку переносящие его бозоны обладают массой ~ 100 ГэВ. В эту эпоху слабые и электромагнитные взаимодействия, бывшие до этого момента времени едиными взаимодействиями, расщепляются на обычные электромагнитные взаимодействия, основным квантом которых является фотон, и слабые взаимодействия с участием нейтрино, основным квантом которых являются W^\pm - и Z -бозоны.

Рождение протонов и нейтронов

Протоны и нейтроны являются составными частицами, они состоят из кварков и глюонов. В почти свободном состоянии кварки и глюоны могут существовать только в очень горячей плазме, температура которой больше (в энергетических единицах), чем масса покоя протона, т. е. при температурах $T > 10^{11}$ К.

⁴⁾ W^\pm и Z^0 — элементарные частицы, которые были открыты в 1980-х годах; после открытия и изучения их свойств объединенная теория электромагнитного и слабого взаимодействий получила статус истинной теории.

В ранней Вселенной температура была значительно больше этой величины, протонов и нейтронов не было, существовал так называемый «кварковый суп». В результате расширения температура падает, кварки начинают соединяться, образуя протоны и нейтроны.

Это происходит примерно при температуре $T \sim 10^{11}$ К.

В свободном состоянии в обычных условиях кварки и глюоны не могут существовать как свободные частицы. Это явление называется «невылетанием кварков», или конфайментом. Взаимодействие кварков друг с другом осуществляют глюоны. Между двумя кварками при взаимодействии образуется «струна» из глюонов, которая сдерживает их от слишком близкого приближения друг к другу и от слишком большого удаления. В том случае, если, прилагая усилия, попытаться разорвать «струну» и «расташить» кварки на бесконечность, то «струна» «лопается» и на месте разрыва образуется новая пара кварк—антикварк, после чего уже две «струны», соединяющие четыре кварка, разлетаются в разные стороны.

Большая температура окружающего вещества позволяет поддерживать такой процесс в равновесии; кварки в таком состоянии являются «квазисвободными» частицами.

Эпоха нуклеосинтеза

После эпохи образования протонов и нейтронов наиболее замечательной является эпоха нуклеосинтеза, о которой была речь выше. Она была в интервале от 1 с до ~ 100 с. В этот период синтезируются легкие ядра с атомным весом ($A < 5$), более тяжелые ядра синтезируются позже в звездах.

Стадия нуклеосинтеза является заключительной стадией, которая относится к ранней Вселенной. В данной книге термин «ранняя Вселенная» будет относиться к эпохе эволюции Вселенной с момента рождения до 3 минут после рождения Вселенной. Конец (3 минуты) выбран не случайно. Именно такая классификация ранней Вселенной была предложена в знаменитой книге Вейнберга «Первые три минуты» [1].

История Вселенной на этой эпохе не кончается.

Наша эра во Вселенной

Эпоха доминирования темной материи

Следующая эпоха, которая играет важную роль в космологии — это эпоха доминирования (преобладания) скрытой массы. Природа скрытой массы до сих пор является неизвестной. Поэтому в космологии различают два вида скрытой массы — HDM (аббревиатура англоязычного термина Hot Dark Matter) или горячая скрытая масса и CDM (Cold Dark Matter) или холодная скрытая масса. Они различаются по нескольким важным параметрам, но основное их различие заключается в том, что в космологических моделях с горячей скрытой массой получаются иные пекулярные скорости галактик, чем в моделях с холодной скрытой массой. Различаются они также по минимальной массе объектов, которые первыми образуются во Вселенной. В качестве HDM материи чаще всего говорят о массивном нейтрино (т. е. нейтрино, обладающем ненулевой массой покоя), хотя роль такой массы могут играть и другие частицы. В качестве носителя CDM чаще всего называют аксионы — гипотетические частицы, призванные в современную физику элементарных частиц для того, чтобы в ядерных взаимодействиях сохранялась СР-инвариантность. Хотя в последнее время в качестве кандидатов на роль холодной скрытой массы все чаще рассматривают стабильные суперпартнеры обычных элементарных частиц, такие, например, как нейтралино. Эпоха доминирования скрытого вещества наступает примерно при температуре $T \sim 10^5$ К, хотя, конечно, точный момент времени зависит от вида скрытой материи и от параметров составляющих ее частиц. Начиная с этой эпохи, растут малые возмущения плотности вещества, которые к нашему времени увеличиваются настолько, что появляются галактики, звезды и планеты.

Эпоха рекомбинации водорода

Вслед за эпохой доминирования скрытой массы наступает эпоха рекомбинации водорода. До рекомбинации во Вселенной существует горячая плазма, состоящая из частиц скрытой

материи, протонов, электронов, фотонов и некоторого количества легких ядер. Во время рекомбинации протоны и электроны объединяются и образуется водород — один из самых распространенных элементов во Вселенной. Эпоха рекомбинации совпадает с эпохой прозрачности Вселенной. Дело в том, что в плазме свет не распространяется свободно. Фотоны сталкиваются с электронами и протонами, рассеиваются, меняют направление движения и частоту. Другими словами, они «забывают» ту информацию, которую несли до столкновения. Физически это можно понять, если привести пример, когда наблюдатель рассматривает некоторую картинку вначале свободно, а затем сквозь мутное стекло. Естественно, во втором случае он видит ее плохо. Если стекло совсем мутное, или, как говорят астрономы, оптическая толщина большая, наблюдатель картинку не видит совсем. Плотная плазма играет роль такого мутного стекла. Начиная с эпохи рекомбинации, плазма исчезает и вещество становится прозрачным. Иногда этот момент времени называют эпохой последнего рассеяния или поверхностью последнего рассеяния. Температура этой эпохи известна очень хорошо из лабораторной физики и приходится на интервал 3 000–4 500 К.

Фотоны, рассеянные последний раз, доходят до наблюдателя, практически не взаимодействуя с веществом по дороге. Эти фотоны и образуют реликтовое излучение. Оно обладает спектром абсолютно черного тела и к настоящему времени имеет температуру 2,75 К. Разница в температурах 3 000 К и 3 К обусловлена тем, что с эпохи последнего рассеяния размер Вселенной увеличился примерно в 1000 раз. Естественно, что все неравномерности распределения температуры по поверхности последнего рассеяния остаются в виде угловой неравномерности распределения температуры реликтового излучения по небу. Наблюдая эти неравномерности или анизотропию, космологи делают выводы о спектре первичных возмущений, об основных параметрах Вселенной и о физике в области энергий 10^{28} К.

Эпоха рекомбинации водорода характеризуется чаще красным смещением. Говорят, что поверхность последнего рассеяния лежит при $z \approx 1\,000$. Наблюдатель находится при $z = 0$.

Другими словами, поверхность последнего рассеяния лежит «рядом» по меркам космологии.

Образование крупномасштабной структуры Вселенной

Однако, в промежутке между эпохой рекомбинации и нашим временем лежит еще одна важная эпоха — образование крупномасштабной структуры Вселенной или образования сверхскоплений галактик. Условно эта эпоха приходится на красное смещение $z \approx 10$, т. е. когда температура реликтовых фотонов падает до 30° К . В промежутке от $z \approx 10$ до $z \approx 0$ лежит эпоха нелинейной стадии эволюции внегалактических объектов, т. е. эпоха обычных галактик, квазаров, скоплений и сверхскоплений галактик. Самый далекий квазар, известный на сегодняшний день, имеет $z \approx 4,7$.

Сейчас астрономы наблюдают хорошо выраженную структуру распределения галактик в крупных масштабах сравнительно близко к нам. Распределение галактик наблюдается таким методом: фотографируются все галактики в выделенных площадках на небе и измеряются их красные смещения. По красным смещениям (а не каким-либо другим способом типа индикаторов расстояний) вычисляется расстояние до галактики и таким образом составляется картина трехмерного распределения галактик в пространстве.

Близкую Вселенную, которая находится от нас на расстоянии $z < 10$ вплоть до $z \approx 0$, изучают не только космологи, но также и специалисты других областей астрономии, в частности, большинство объектов в этом диапазоне красных смещений изучается методами внегалактической астрономии. Это тоже важная и интересная область современной астрономии. Однако ее обсуждение завело бы нас слишком далеко от основного сюжета этой книги.

Новая эра инфляции?

В конце 1998 года астрономы совершили новое открытие — обнаружено ускоренное расширение нашей Вселенной. Сейчас Вселенная частично заполнена веществом, по своим свойствам

подобным пыли, а частично плотность Вселенной обеспечивается новым видом материи — квинтэссенцией, или Λ -членом. В ранней Вселенной Λ -член обеспечивал инфляцию. Величина его была значительно больше, и он являлся не новой фундаментальной мировой константой, а генерировался в результате некоторых процессов, происходящих в ранней Вселенной.

Современный Λ -член может также иметь «динамическое» происхождение, он может быть результатом неких физических процессов, которые мы пока не понимаем. Но он может быть также новой фундаментальной константой. Будущие исследования должны подтвердить существование ненулевого параметра ускорения нашей Вселенной и разгадать его природу.

Сейчас можно только сказать, что плотность обычного вещества во Вселенной убывает как куб масштабного фактора, а плотность вещества, ассоциированного с Λ -членом, остается постоянной в ходе расширения (точнее, меняется значительно медленнее, чем куб масштабного фактора). Это значит, что близка эпоха (по космологическим меркам) доминирования этого нового вида материи, новая эпоха экспоненциального расширения, новая эпоха инфляции.

Таковы основные эпохи развития нашей Вселенной, которые изучает космология. Идеи и факты, обсуждающиеся в этой главе, с большой степенью подробности изложены в [3].

Законы, управляющие эволюцией нашего мира

Вселенная кажется бесконечной. Идея бесконечности Вселенной овладела астрономами к концу прошлого века. С каждым новым поколением астрономических телескопов открывались новые объекты во Вселенной, каждый раз они были расположены дальше. Неравномерное распределение плотности сглаживалось при переходе к новым масштабам, распределение вещества становилось все более однородным. При теоретическом описании Вселенной это представляло собой наибольшую, я бы даже сказал, до некоторых пор неразрешимую трудность.

В чем дело? Основная сила, которая управляет движением миров — это сила гравитации. Напомним, что основное соотношение, описывающее гравитационное взаимодействие, было открыто И. Ньютоном и выглядит так:

$$\vec{F} = -\frac{Gm_1m_2}{r^2}\vec{n}. \quad (4.1)$$

Здесь m_1 , m_2 — массы двух тел, G — гравитационная постоянная, r — расстояние между телами. Вектор \vec{n} направлен от одного тела к другому, а его направление выбрано так, чтобы вектор \vec{F} описывал силу притяжения. Если теперь мы попробуем вычислить гравитационную силу, которая воздействует на какую-либо частицу со стороны вещества в бесконечной Вселенной, то обнаружим, что эта сила бесконечна.

Бесконечная сила действует на пробную частицу с одной стороны, бесконечная сила действует на нее с противоположной стороны. Они вычитаются, но результат вычитания зависит

от способа вычитания¹⁾. Теория, которая описывала бесконечный мир с однородно распределенным веществом, зависела от выбора автора! Конечно, большинство астрономов к таким теориям относились с некоторой долей иронии.

Проблема оказалась решаемой только после создания общей теории относительности. После создания современной релятивистской космологии выяснилось, что и в рамках ньютоновской картины мира можно найти адекватное описание однородной и бесконечной Вселенной. Развитие теоретического подхода к описанию бесконечной Вселенной с однородным распределением вещества будет обсуждено в этой главе. Она — самая насыщенная формулами глава книги, хотя используются в основном уравнения классической механики. В тех случаях, когда ньютоновских законов оказывается недостаточно, или они неадекватно описывают Вселенную, будут делаться специальные оговорки.

Фридмановская модель

Ниже будут употребляться понятия, которые являются чисто космологическими; они не используются в других областях астрономии или физики. В этой главе такие понятия будут объяснены. Для этого будут использоваться математические и физические понятия и уравнения. Хотя математический аппарат современной космологии очень сложен, некоторые основные понятия можно рассказать, не прибегая к специальным знаниям. Поэтому при объяснениях я буду стараться избегать сложных понятий. Для того чтобы разобраться в излагаемом ниже материале, требуются знания в объеме старших классов средней школы.

Когда мы говорим о расширяющейся Вселенной, мы имеем в виду, что галактики разлетаются, удаляясь друг от друга. В модели Фридмана галактики заменены пробными частицами, обладающими массой. Частиц в такой модели много, при анализе становится естественным не рассматривать движение каждой

¹⁾ Вообще говоря, работа с расходимостями в математике представляет трудность даже сегодня. Сто лет назад эта работа была еще труднее.

частицы отдельно, а использовать параметры, принимающие непрерывные значения.

При описании непрерывной среды в рамках ньютоновой механики можно пользоваться переменными Эйлера²⁾, а можно — Лагранжа. Переменные Эйлера будем обозначать буквами латинского алфавита x, y, z , а переменные Лагранжа буквами греческого алфавита ξ, η, ζ . Рассмотрим плотность среды ρ как функцию x и t . Если мы полагаем $x = \text{const}$, то значит мы следим за эволюцией среды в определенной точке пространства. При этом мы не следим за судьбой отдельных частиц. Если же мы хотим рассмотреть закон движения отдельной частицы, то мы должны решить дифференциальное уравнение и найти как изменяется координата частицы $x(t)$ в каждый момент времени. Функция $x(t)$ зависит от нескольких параметров, одним из таких параметров является начальное положение частицы. Зафиксируем положение частиц в начальный момент времени t_0 и обозначим положение каждой частицы греческой буквой ξ , значение которой у каждой частицы — свое. Тогда законы движения каждой частицы можно представить в виде функции двух переменных $x(t, \xi)$ ³⁾. Здесь первый параметр — время, а второй параметр — номер частицы (или, как говорят в математике, начальное значение координаты). Полагая теперь $\xi = \text{const}$ мы следим за эволюцией среды, сопутствующей выбранной частице.

Рассмотрим описание эволюции сплошной среды в переменных Эйлера и Лагранжа на примере расширяющейся Вселенной. Отдельные галактики будем нумеровать координатой ξ , а их положение в пространстве координатой x . Физическое расстояние между двумя галактиками есть:

$$x(t) = a(t)\xi, \quad (4.2)$$

где ξ — «сопутствующее» расстояние или расстояние, взятое в некоторый момент времени, $a(t)$ — функция времени,

²⁾ Так в механике сплошной среды называется один из способов описания эволюции этой среды, в честь знаменитого русского ученого, члена императорской академии наук Л. Эйлера.

³⁾ Вообще говоря, необходимо также знать начальное значение скорости, но для рассматриваемой задачи это не важно.

которая характеризует изменение расстояний между галактиками со временем. В космологии эта функция несет очень важную нагрузку. Она называется масштабным фактором расширяющейся Вселенной и показывает, как изменяются масштабы со временем.

Закон Хаббла отсюда можно получить следующим способом. Рассмотрим расстояние между двумя галактиками, в одной из которых находится наблюдатель. Она будет иметь координату $\xi = 0$. Мы будем рассматривать их в различные, но близкие моменты времени $x(t_2)$ и $x(t_1)$. Разность этих величин $\Delta x = x(t_2) - x(t_1)$ равна расстоянию, на которое вторая галактика отлетела от первой за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$. Скорость удаления второй галактики от первой равна, соответственно, $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$. Вместо Δx подставим теперь произведение масштабного фактора на величину ξ из уравнения 4.2, тогда получим новое уравнение для скорости удаления галактик друг от друга

$$v = \frac{a(t_2) - a(t_1)}{\Delta t} \xi.$$

Теперь разделим получившееся уравнение для скорости на уравнение (4.2) для связи физического расстояния x и масштабного фактора. Получим, что отношение скорости к расстоянию зависит только от масштабного фактора и его производной по времени:

$$\frac{v}{x} = \frac{1}{a(t_1)} \frac{a(t_2) - a(t_1)}{\Delta t}. \quad (4.3)$$

Величина, которая стоит в правой части уравнения, называется параметром Хаббла. Другими словами, постоянная Хаббла равняется производной от масштабного фактора, разделенной на сам масштабный фактор.

Начальное расстояние между частицами выпало из уравнения Хаббла, это важное заключение. Такой закон движения формируется в очень специфических условиях, которые будут описаны в главе 8, посвященной инфляционной стадии развития Вселенной.

Гравитационное взаимодействие в однородном мире

Рассмотрим физические законы, управляющие эволюцией Вселенной. Выделим в однородной и изотропной Вселенной шар, радиус которого равен $x(t)$. В ньютоновской гравитационной теории существует теорема, согласно которой внутри шара, вырезанного в однородном распределении вещества, сила тяготения равна нулю. Поясним ее. Рассмотрим сферу, толщина поверхностного слоя которой значительно меньше, чем ее радиус (см. рис. 4.1), обладающую равномерной плотностью по всей поверхности. Вычислим силу притяжения, действующую на некоторую точку Q , находящуюся внутри сферы. Для этого проведем конус с вершиной в этой точке до пересечения со сферой, кроме того, проведем соосный конус в противоположном направлении. Сечение первого конуса со сферой обозначим Σ_1 , сечение второго Σ_2 . Масса первого сечения равна поверхностной плотности сферы σ , умноженной на площадь сечения: $M_1 = \sigma \times \Sigma_1$, а масса

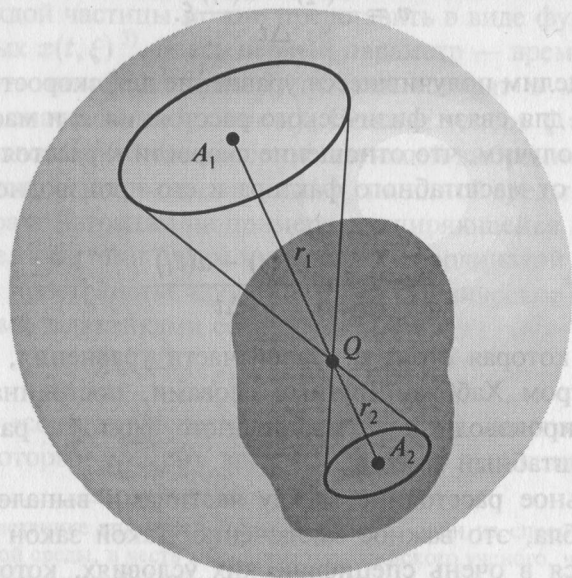


Рис. 4.1. Рисунок, поясняющий основной закон гравитации в однородно и изотропно распределенном веществе

второго $M_2 = \sigma \times \Sigma_2$. Разность сил притяжения, действующих на точку Q (с массой m) со стороны каждой части сферы, равна:

$$\Delta F = Gm \frac{M_1}{r_1^2} - Gm \frac{M_2}{r_2^2}.$$

Поскольку масса каждого из участков пропорциональна площади участка, а площадь участка равна квадрату расстояния, умноженного на телесный угол ω , то разность сил, действующая на точку Q , равна нулю.

Распространим наше рассуждение на оставшуюся часть сферы. Покроем всю оставшуюся часть сферы соосными конусами, пересекающимися в точке Q . Тогда, рассуждая так же, как и прежде, мы убедимся, что **полная** гравитационная сила, действующая на точку Q со стороны сферы, равна нулю.

Теперь рассмотрим другую сферу, центр которой совпадает с нашей. Пусть радиус этой сферы будет больше. Притяжение со стороны этой сферы на точку Q вновь отсутствует! Осталось сделать только один шаг в наших рассуждениях. Вырежем в однородно распределенном веществе (напомню, что плотность в таком веществе одинакова во всех точках пространства) шар. Уберем все вещество из шара. Посадим в центр шара наблюдателя O . Пусть его масса будет пренебрежимо мала и не будет оказывать влияния на движение остальных тел во Вселенной. Сила тяжести внутри шара будет отсутствовать. Это значит, что любая другая точка (которая имеет пренебрежимо малую массу) внутри шара, скажем, точка Q , будет «висеть» относительно наблюдателя неподвижно. Вещество вне шара может менять, например, свою плотность или границы сферы могут удаляться с некоторой скоростью от наблюдателя; на взаимном движении наблюдателя O и точки Q это никак не отразится! Не видя внешнего вещества, O и Q просто не будут «знать» о его существовании.

Но попробуйте добавить немного вещества между O и Q . Картина сразу изменится. Возникнет сила притяжения к кусочку вещества, и наблюдатель O начнет двигаться к нему. Также будет двигаться и вторая точка Q . Естественно, это сразу будет заметно.

Из этих рассуждений можно сделать простой вывод.

Рассмотрим бесконечное пространство, заполненное однородно распределенным веществом. Выделим в пространстве движение двух пробных частиц; одна частица является наблюдателем O , вторая — каким-либо внегалактическим объектом, например, квазаром Q . Вывод, который можно сделать из приведенных выше рассуждений, заключается в том, что движение точки Q относительно точки O определяется только массой, заключенной в шаре, проведенном вокруг точки O с радиусом, равным расстоянию от O до Q .

Эта масса равна (в ньютоновой теории)

$$M = \frac{4\pi}{3} \rho x^3. \quad (4.4)$$

Почему сделана оговорка «в ньютоновой теории»? Дело в том, что в космологии уравнения движения, законы сохранения и т. п. необходимо записывать в релятивистском виде. Они несколько отличаются от аналогичных законов в ньютоновской физике. Так, соответствующая масса (M), которая стоит в законе сохранения энергии вида

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{GmM}{x} = \text{const} \quad (4.5)$$

и определяет потенциальную энергию пробной частицы с массой m в гравитационном поле массы M , в точности совпадает с классическим определением массы (4.4).

Однако в законе движения, который получается из закона сохранения энергии дифференцированием его по времени, масса притягивающего тела определяется уже с учетом полной энергии этого тела. Если масса пробного тела (m) может рассматриваться как постоянная, то масса шара с центром в точке O и радиусом равным расстоянию от O до Q уже не может рассматриваться как постоянная. Масса такого шара при расширении меняется, поскольку давление совершает работу, т. е. меняется энергия, которая тоже весит! Напомним, что в релятивистской физике масса и энергия связаны соотношением $E = Mc^2$.

Поэтому определение массы (источника гравитационного поля) в уравнениях движения в релятивистской теории отличает-

ся от классической теории. В классической физике масса равняется произведению плотности на объем, в релятивистской теории к этому определению добавляется еще одно слагаемое — произведение утроенного давления, умноженного на объем и деленного на квадрат скорости света. Это чисто релятивистская добавка.

$$M = \frac{4\pi}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) x^3. \quad (4.6)$$

В обычной (не релятивистской) ситуации, когда можно считать, что утроенное давление, существующее в веществе, поделенное на квадрат скорости света, значительно меньше, чем плотность самого вещества, второе слагаемое значительно меньше первого и его вклад в массу становится пренебрежимо малым.

Поскольку сила обратно пропорциональна квадрату расстояния, можно записать замедление A , которое испытывает пробный квазар Q относительно наблюдателя:

$$A = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) x. \quad (4.7)$$

Здесь G — гравитационная постоянная. Замедление определяется второй производной от расстояния по времени. Поскольку расстояние между квазаром и наблюдателем равно произведению масштабного фактора $a(t)$, который является функцией времени, и постоянной величины ξ , то уравнение движения квазара содержит только масштабный фактор в качестве неизвестной величины в уравнении.

При обсуждении законов движения и расширения нашего мира в космологии используют еще несколько параметров. Поскольку в дальнейшем они будут часто использоваться, введем определения этих параметров. Уравнения общей теории относительности однозначно предсказывают закон расширения Вселенной, если известны плотность энергии ρc^2 и давление p вещества (в однородной и изотропной модели) [5]. Плотность энергии часто выражают с помощью параметра $\Omega = \frac{\rho}{\rho_{\text{crit}}}$, а давление — уравнением состояния $p(\rho)$. Здесь ρ_{crit} — так называемая критическая плотность Вселенной, выражаемая через параметр Хаббла в виде $\rho_{\text{crit}} = \frac{3H^2}{8\pi G}$.

Уравнение состояния вещества в космологии определяется через постоянную q , связывающую давление и плотность $p = q\rho c^2$. Подчеркнем, что все уравнения состояния вещества, известные в лабораторной физике, эквивалентны $q = 0$, поскольку давление даже в сверхсжатом веществе значительно меньше, чем плотность энергии покоя такого вещества

$$\frac{p}{\rho c^2} \sim 10^{-16}.$$

Рассмотрим вновь квазар Q (пусть его масса есть m) и наблюдателя O . Расстояние между ними определяется как $x(t) = a(t)\xi$, а скорость квазара относительно наблюдателя определяется законом Хаббла $v = Hx$. Подставим эти выражения для скорости и расстояния в уравнение (4.5) с учетом того, что масса определяется согласно (4.4). Тогда получим простенькое уравнение, связывающее параметр Хаббла, плотность и масштабный фактор. Квадрат параметра Хаббла выражается через плотность Вселенной. Это есть первое уравнение Фридмана. Второе уравнение получается из анализа уравнения для гравитационных сил, действующих между квазаром и наблюдателем.

Итак, первое уравнение Фридмана — это уравнение сохранения потенциальной и кинетической энергии квазара.

Рассматривая шар целиком можно убедиться, что первое уравнение Фридмана — это уравнение сохранения удельной кинетической энергии самого шара и его потенциальной энергии. Постоянная величина в правой части (4.5) имеет смысл полной энергии. В космологии она связана с кривизной фонового пространства и обозначается k .

Анализ эволюции Вселенной требует, кроме этих двух уравнений, вычислить также зависимость плотности от времени.

Эволюция однородного мира

Начнем теперь рассматривать эволюцию выделенного шара; так мы сможем узнать эволюцию Вселенной. Прежде всего рассмотрим движение вещества. Как видно из уравнений Фридмана, в космологии движение сводится только к изменению плотности

вещества со временем. Так происходит потому, что плотность вещества во всех точках пространства одинакова, и перемещение вещества — это изменение его плотности в среднем. Конечно, наблюдатель O может заметить, что плотность вокруг него уменьшается (разумеется, за космологические промежутки времени). Но если наблюдатель будет следить за вполне определенной точкой, скажем, квазаром Q , то он заметит, что и расстояние между ним и выбранным квазаром меняется. Квазар Q удаляется от наблюдателя по инерции, масса части Вселенной, которая содержится в шаре с радиусом от O до Q , притягивает квазар, замедляя его движение⁴⁾.

Здесь уместна аналогия с ракетой, стартовавшей с Земли и радиально улетающей в космическое пространство. Если скорость, до которой разогналась ракета на участке работы двигателей, меньше второй космической, то ракета поднимется до самой высокой точки (апогей), развернется и упадет на Землю. Полная энергия ракеты после окончания работы двигателей отрицательна, в нашем случае это соответствует значению постоянной $k = +1$.

Шар радиуса $x(t)$ в космологии ведет себя подобно ракете. Он начинает расширяться (после окончания стадии инфляции) по инерции с большой скоростью. Вместе с шаром расширяется и весь остальной мир. Шар достигает максимального радиуса расширения, т. е. масштабный фактор $a(t)$ принимает максимальное значение, а затем начинает сжиматься. При этом зависимость масштабного фактора от времени изображена на рис. 4.2.

Вернемся вновь к аналогии с ракетой. Когда полная энергия ракеты равна нулю, она уже не упадет на Землю. Ракета улетит с Земли на бесконечное расстояние. Но скорость ракеты по пути все время будет падать. Как говорят физики, на бесконечности скорость ракеты будет нулевой. Такая же ситуация и в космологии при $k = 0$. Масштабный фактор увеличивается беспредельно, но параметр Хаббла (скорость расширения) все время уменьшается, стремясь к нулю на бесконечности.

⁴⁾ Возможности ускорения выбранного квазара относительно наблюдателя, о чем появились экспериментальные свидетельства, мы обсудим в главе 16.

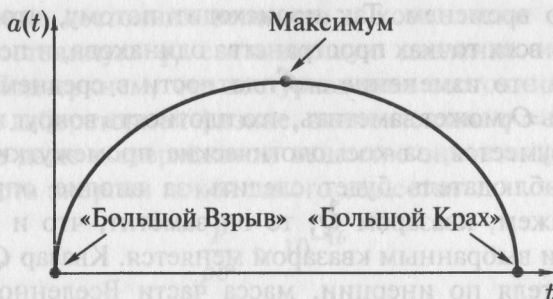


Рис. 4.2. На рисунке изображена эволюция масштабного фактора как функция времени для замкнутого мира. В таком мире расстояние между любыми двумя пробными частицами в момент $t = 0$ начинает увеличиваться, достигает максимального значения, определяемого максимальным значением масштабного фактора, а затем начинается его уменьшение. В момент времени $t = 0$ Вселенная начинает расширяться, как говорят космологи, из сингулярного состояния, идет «Большой Взрыв»; в некоторый момент времени Вселенная проходит через максимум расширения и начинает вновь сжиматься, происходит «Большой Крах»

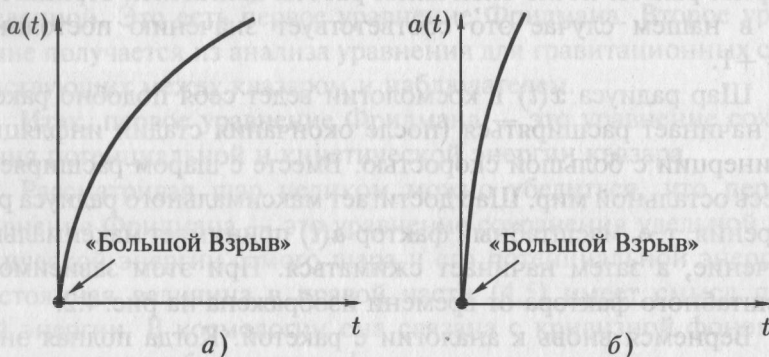


Рис. 4.3. На рисунке изображена эволюция масштабного фактора как функция времени для: а) плоского и б) открытого мира. Расстояние между двумя пробными частицами в момент $t = 0$ начинает увеличиваться, Вселенная начинает расширяться из сингулярного состояния. Начинается «Большой Взрыв», который продолжается вечно. Скорость расширения уменьшается, касательная к кривой зависимости $a(t)$ (скорость расширения) стремится а) к нулю, б) к постоянной ненулевой величине

При положительной полной энергии, когда двигатели работают достаточно долго, и придают ракете скорость, превышающую вторую космическую, ракета улетает на бесконечное

расстояние от Земли, сохраняя на бесконечности ненулевую скорость. Так же и наш шар в случае $k = -1$. Масштабный фактор растет неограниченно, скорость расширения стремится к постоянной ненулевой величине с ростом времени.

Полного тождества эволюции Вселенной и полета ракеты, конечно, нет. Существует несколько принципиальных различий. Основное различие в том, что ракета все время летит в плоском (евклидовом) пространстве. В случае Вселенной три различных значения k соответствуют трем типам геометрии трехмерного пространства, в котором разыгрывается эволюция.

Это принципиальное отличие общей теории относительности от ньютоновской теории гравитации. Пространство-время в общей теории относительности в общем случае является неевклидовым. Однако случай $k = 0$ описывает евклидово пространство с бесконечным объемом. Хорошим наглядным образом этого пространства является в двумерном случае (его достаточно просто представить себе) плоскость. Плоскость, вложенная в трехмерное пространство, представляет образ плоского трехмерного сечения четырехмерного пространства Вселенной с $k = 0$ (см. рис. 4.3).

Случай $k = +1$ соответствует замкнутой Вселенной. Полный объем трехмерного пространства конечен, хотя границ у такого пространства нет. Прибегнем вновь к нашей аналогии, двумерному пространству, вложенному в трехмерное для того, чтобы представить его наглядный образ. Хорошим двумерным аналогом такого пространства является сфера, вложенная в трехмерное пространство. Площадь сферы определяется ее радиусом $4\pi R^2$, хотя сама сфера краев не имеет. Площадь двумерной поверхности аналогична объему трехмерного пространства. Так же и замкнутое трехмерное пространство имеет конечный (теперь уже) объем, но не имеет краев (или границ). Вернемся к двумерной сфере в трехмерном пространстве. Предположим, что на ней могут жить двумерные существа (см. рис. 4.4).

Эти существа могут неограниченно двигаться в одном, избранном направлении. Не поворачивая назад, время от времени они будут проходить одни и те же точки пространства. Именно это указывает на конечный объем пространства. Сфера с растущим радиусом является хорошим аналогом расширяющегося

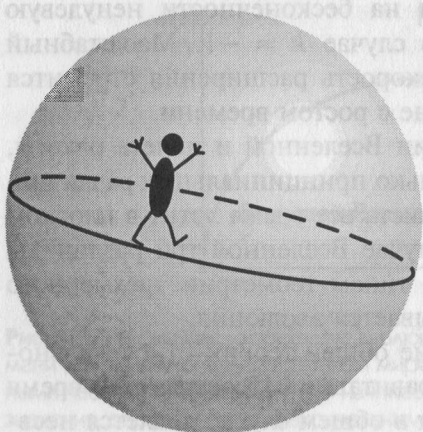


Рис. 4.4. На этом рисунке изображена двумерная сфера с двумерным жителем. Для него прямой линией является дуга большого круга. Двигаясь все время по прямой, житель обогнет сферу и вновь начнет проходить через те же точки пространства, через которые он уже прошел

уведет нас в сторону от главного предмета — космологии. Поэтому мы вновь обратимся к обсуждению физических характеристик нашего мира.

Отношение удельной потенциальной энергии выделенного шара к его удельной кинетической энергии равно параметру плотности Ω . Поэтому космологи говорят, что параметр плотности Ω определяет геометрию нашего мира. Если $\Omega = 1$, то $k = 0$, геометрия нашего мира совпадает с евклидовой, трехмерное пространство бесконечно. Случай $\Omega < 1$ соответствует $k = -1$, геометрия нашего мира соответствует геометрии Лобачевского, трехмерное пространство тоже является бесконечным. Однако, если $\Omega > 1$, мир замкнут и обладает римановой геометрией, его трехмерный объем конечен.

Поэтому одной из важнейших задач наблюдательной космологии всегда была задача измерения глобального параметра Ω .

замкнутого пространства. При этом роль оси времени играет радиальная координата.

Представить себе трехмерное замкнутое пространство невозможно. Добавим только, что такая трехмерная геометрия называется геометрией Римана.

Открытая Вселенная имеет $k = -1$. В такой Вселенной реализуется трехмерная геометрия Лобачевского. Естественно, что двумерным аналогом такой геометрии является искривленная поверхность. Эта поверхность похожа на поверхность седла.

Можно много описывать удивительные свойства искривленного мира, однако это

В начале XX века вопрос о том, замкнута наша Вселенная или открыта, приобретал поистине мистический смысл. Сегодня мы знаем, что проблема устройства Вселенной значительно сложнее; Вселенная, скорее всего, является сильно неоднородной на сверхбольших масштабах. Это масштабы значительно больше, чем расстояния до самых далеких квазаров, может быть в 10^{1000} раз. Поэтому теряет смысл сама классификация типов на открытую, плоскую или замкнутую Вселенную, поскольку эта классификация справедлива только для однородной Вселенной (начиная с некоторого масштаба, который значительно меньше расстояний до квазаров и кончая бесконечно большими масштабами).

Итак, расширение Вселенной описывают два уравнения Фридмана. Первое уравнение, аналогичное (4.5), можно назвать законом сохранения удельной энергии. В нем член, описывающий кинетическую энергию частицы $\frac{mv^2}{2}$, заменяется членом, описывающим удельную (на единицу массы) кинетическую энергию $\frac{1}{2}H^2$. Вместо потенциального члена вида $\frac{GmH}{x}$ появляется удельная потенциальная энергия $\frac{4\pi G}{3}\rho$ расширяющегося мира, а также член, аналогичный постоянной величине в (4.5). В первом уравнении Фридмана он называется вкладом кривизны $\frac{k}{2a^2}$. Второе (4.7) определяет связь удельного приливного замедления A с плотностью ρ и давлением p . Знак минус в этом уравнении означает, что для случая обычного вещества $\rho + \frac{3p}{c^2} > 0$ имеет место замедление Вселенной при расширении ее по инерции.

Если, кроме этого, задана зависимость $p = p(\rho)$, то все необходимые функции будут определены.

Заметим также, что из уравнений Фридмана следует закон изменения плотности $\Delta\rho$ в расширяющемся мире:

$$\Delta\rho = -3H\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right)\Delta t. \quad (4.8)$$

Знак минус в этом уравнении соответствует простому факту. При расширении $H > 0$ плотность убывает $\Delta\rho < 0$ (изменение плотности за промежуток времени Δt является отрицательной величиной). Конечно, плотность убывает только в том случае, когда сумма плотности и давления, т. е. $\rho + \frac{p}{c^2}$, является величиной

положительной. Это последнее условие в космологии называется условием слабой энергодоминантности, и считается, что оно выполняется всюду, даже в сингулярности (впрочем, некоторые космологи полагают, что в сингулярности это условие может нарушаться).

В космологии различают три основных уравнения состояния. Это пылеподобное уравнение состояния ($p = 0$), радиационно доминированное уравнение состояния ($p = \frac{\rho c^2}{3}$) и уравнение состояния фальшивого вакуума ($p = -\rho c^2$). Здесь следует отметить, что все уравнения состояния, известные из обычной лабораторной физики, в космологических терминах являются уравнениями состояния пыли ($p = 0$). Несмотря на то, что по обычным меркам в лабораторных условиях может развиваться очень большое давление, в релятивистском смысле это давление пренебрежимо мало. Действительно, в уравнения Фридмана давление p входит как слагаемое наряду с плотностью энергии ρc^2 , другими словами, при оценке вклада давления в эту сумму необходимо рассматривать величину $\frac{p}{\rho c^2}$. Оценим это отношение, например, для обычной воды. Плотность воды $\sim 1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, а давление на глубине 1 м составляет 1 атм или $10^6 \text{ дин} \cdot \text{см}^{-2}$. Плотность энергии воды (ρc^2) составляет $9 \cdot 10^{20} \text{ дин} \cdot \text{см}^{-2}$. Отношение этих двух чисел составляет 10^{-14} , т. е. ничтожно малую добавку к единице. Именно поэтому, если бы Вселенная была заполнена обычной водой, можно было бы смело полагать, что уравнение состояния во Вселенной имеет вид $p = 0$.

Решения космологических уравнений обычно начинают с решений уравнения сохранения энергии для того, чтобы определить взаимосвязь между плотностью и масштабным фактором. В космологии плотность вещества при расширении уменьшается обратно пропорционально масштабному фактору в некоторой степени:

$$\rho(t) = \rho_0 \left(\frac{a_0}{a(t)} \right)^n. \quad (4.9)$$

Решения этого уравнения имеют простой физический смысл. В случае, когда давление равно нулю, среда состоит из невзаимо-

действующих частиц пыли. Плотность такой среды при расширении меняется пропорционально изменению объема или обратно пропорционально кубу масштабного фактора $\sim a^{-3}$. Действительно, число частиц сохраняется, а Вселенная расширяется, значит ее плотность уменьшается пропорционально увеличению объема.

Давление в первичной плазме очень велико $p = \frac{\rho c^2}{3}$ (радиационно-доминированное уравнение состояния). Им нельзя пренебрегать при решении уравнений Фридмана; среда состоит из релятивистских частиц, подобных по своему поведению фотонам. При расширении Вселенной меняется не только плотность частиц (обратно пропорционально кубу масштабного фактора $\sim a^{-3}$), но и меняется энергия каждой частицы ($\sim a^{-1}$), что приводит к изменению плотности энергии обратно пропорционально четвертой степени масштабного фактора, $\rho c^2 \sim a^{-4}$.

Сделаем важное замечание, которое выглядит очевидным, но понадобится нам в дальнейшем, когда будем рассматривать различные модели ранней Вселенной. В однородном и изотропном мире плотность является функцией только одной переменной — времени. Уравнение для плотности можно обратить и выразить время как функцию средней плотности Вселенной. Так можно ввести определение времени во Вселенной.

Отметим еще одно важное уравнение состояния, которое понадобится в дальнейшем. Это так называемое вакуумоподобное уравнение состояния или инфляционное уравнение состояния: $p = -\rho c^2$. Отрицательное давление имеет простой физический смысл. Это силы натяжения. Если обычное положительное давление препятствует сжатию вещества, то отрицательное давление препятствует растяжению вещества. Тем не менее, в лабораторных условиях такое уравнение состояния не встречается. Во-первых, потому что при таком уравнении развивается очень большое (релятивистское) отрицательное давление, а во-вторых, потому что это давление паскалево, т. е. действует независимо от направления. Натяжения в обычном твердом теле (например, натяжения, возникающие в резине) являются непаскалевыми, они возникают только в одном направлении.

В нашем случае отрицательного давления плотность среды не зависит от времени и масштабного фактора. Для того, чтобы убедиться в этом, подставим зависимость $p = -\rho c^2$ в уравнение, показывающее как меняется плотность вещества при расширении (4.9), и получим, что изменение плотности $\Delta\rho = 0$ независимо от H и Δt ! При расширении плотность этой среды не меняется. В обычной физике только у вакуума плотность не меняется при расширении, поэтому такое состояние иногда называют состоянием фальшивого (или ложного) вакуума.

Заметим, что в состоянии ложного вакуума плотность не зависит от времени. Теряется возможность определить направление течения времени как последовательность слоев уменьшающейся плотности. Это не случайно. В мире с постоянным отрицательным давлением (или в мире с Λ -членом) временное и пространственные направления равноправны.

Определив зависимость плотности от масштабного фактора, подставляем ее в уравнения Фридмана и получаем зависимость самого масштабного фактора от времени, т. е. закон расширения нашей Вселенной. Естественно, что этот закон зависит как от уравнения состояния, так и от топологии Вселенной, т. е. от величины k . Для случая Вселенной, доминированной пылью (при $k = 0$, т. е. для случая пространственно-плоской, современной Вселенной), зависимость масштабного фактора от времени имеет вид:

$$a(t) = a_0 t^{2/3}.$$

Как видно из этого выражения масштабный фактор увеличивается со временем до бесконечности.

Начало расширения — сингулярность

Сейчас масштабный фактор велик, но в момент $t = 0$, как написано выше, он был равен нулю. На рис. 4.2, 4.3 видно, что момент $t = 0$ соответствует нулевому масштабному фактору. Момент времени, когда масштабный фактор был равен нулю, называется сингулярностью. В этот момент времени плотность Вселенной, давление в ней, а также температура вещества

становятся бесконечно большими. Это особая точка. Поэтому она и называется сингулярностью.

В начале нашего века казалось, что сингулярность присуща только решению Фридмана. Аналогия с расширением шара в теории Ньютона только укрепляла эту точку зрения. Действительно, если рассматривать сжатие невзаимодействующих (пробных) частиц, обладающих, тем не менее, массой, которые падают в точку, то они достигают центра, плотность таких частиц в центре становится бесконечной, а затем все частицы начинают разлетаться из центра. Это модель сингулярности. Но если таким частицам, в начале сжатия, придать небольшие нерадиальные скорости, частицы пролетят мимо центра, плотность такой среды будет конечна, сингулярность исчезает.

Однако в середине нашего века знаменитыми английскими космологами (Пенроузом и Хокингом) было доказано, что сингулярность — это естественное свойство всех космологических решений. Этот нетривиальный факт побудил космологов исследовать сингулярность.

Бесконечно большая энергия реальных частиц (или температура космической плазмы), которая должна достигаться в сингулярности, вообще говоря, противоречит квантовой механике. Поэтому космологи питают надежды, что будущая теория гравитации — квантовая гравитация или струнная гравитация — решит проблему сингулярности, плотность не будет превышать планковского значения $\rho_{\text{pl}} = \frac{m_{\text{pl}}}{l_{\text{pl}}^3} \approx 10^{94} \text{ г/см}^3$.

О современных взглядах на природу сингулярности мы расскажем в следующей главе «Рождение Вселенной».

Горизонт в расширяющейся Вселенной

Введем еще одно чрезвычайно важное понятие. Это понятие горизонта частиц в космологии. Размер горизонта частиц определяет размер областей причинной связности в расширяющейся Вселенной. Как мы уже выяснили, Вселенная существует конечное время. Оно составляет примерно 20 млрд лет. Свет за время, прошедшее со времени «Большого Взрыва», может пройти только 20 млрд световых лет, если он будет распространяться в плоском

пространстве-времени, в стационарном мире. Никакое взаимодействие не распространяется быстрее, чем свет. Это значит, что две точки, разделенные расстоянием больше, скажем, 100 млрд световых лет, никогда не взаимодействовали. Они не состояли, как говорят физики, в причинной связи. Более того, одна точка, грубо говоря, «не знает» о существовании другой!

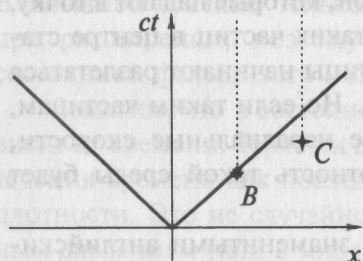


Рис. 4.5. Здесь показана ct — x -диаграмма. На ней физики изображают единое четырехмерное пространство-время и различные события в этом четырехмерном пространстве. Поскольку одной из осей является время, то на такой диаграмме показывается не только положение объектов, но и их движение или временная эволюция

В специальной теории относительности даже придуманы соответствующие диаграммы, которые мы сейчас обсудим. На рис. 4.5 показана такая диаграмма. По вертикальной оси координат отложено время, умноженное на скорость света, а по горизонтальной оси одна из пространственных координат. Временная координата умножена на скорость света не случайно; во-первых, обе координаты имеют одинаковую размерность, во-вторых, скорость распространения света в координатах с такой размерностью равна единице. Свет на такой диаграмме распространяется по прямым, под углом 45° . Специалисты по теории относительности называют линии на такой диаграмме мировой траекторией частицы. Мировая траектория наблюдателя, который покоится относительно выбранной системы отсчета, представляет собой прямую линию, параллельную оси времени (для такого наблюдателя время меняется равномерно, а пространственная координата остается неизменной). На диаграмме показаны два пространственно-временных события: B и C , которые являются причинно не связанными.

Свет устанавливает причинную связность. Если две точки в пространстве-времени (B и C) не могут быть соединены лучом света за промежуток времени T , то событие, произошедшее в одной из двух точек в течение этого промежутка времени, останется

неизвестно в другой и никак не повлияет на состояние вещества или наблюдателя, находящегося в этой точке. Так, на диаграмме видно, что события B и C являются причинно не связанными, в то же время, если пройдет еще некоторое время, то сигнал о событии B дойдет до точки, в которой произошло событие C , и наблюдатель, находящийся в этой точке, узнает о событии B .

Поясним на примере. Скажем, что в точке B произошел взрыв ядерной бомбы. Сразу после взрыва от бомбы пошло световое излучение, ударная волна и тепловая волна. Ударная волна движается значительно медленнее светового излучения. Поэтому наблюдатель сначала получает информацию о том, что взрыв был, в виде световой вспышки, он пригибает голову, и мимо него с грохотом следует ударная волна. В данном случае физические условия, соответствующие взрыву, устанавливаются ударной и тепловой волной. Причина — взрыв, следствие — установление условий, соответствующих взрыву. Следствия устанавливаются со скоростью ударной и тепловой волны. Однако, информация о происшедшем взрыве устанавливается с помощью световых сигналов. Ничто в природе не движется быстрее скорости света. Поэтому в качестве предельного радиуса установления причинной связи в физике рассматривается радиус, образуемый двигающимися лучами света.

В нестационарной Вселенной такой радиус имеет имя собственное — горизонт частиц. Точные размеры горизонта частиц в расширяющейся Вселенной получаются, если учесть ее расширение. Естественно, точная формула для горизонта частиц будет зависеть от темпа расширения. Считается, что темп расширения в современной нам Вселенной такой, что размер горизонта частиц определяется как $l = 2 \cdot H^{-1}$.

Зачем столь подробно обсуждать столь очевидную вещь? Размер горизонта частиц имеет важный смысл. Прежде всего, обратим внимание на то, что размер горизонта прямо пропорционален времени, прошедшему с момента «Большого Взрыва». Размер горизонта растет со временем. Две точки, разделенные расстоянием больше чем l , никогда не взаимодействовали в прошлом. Вспомним об эпохах во Вселенной. После эпохи рекомбинации плазма стала прозрачной и реликтовые фотоны

распространяются во все стороны практически свободно. Размер горизонта частиц на время, которое соответствует рекомбинации, составляет $\sim 900\,000$ световых лет. Поэтому сейчас размер, соответствующий горизонту частиц на стадии рекомбинации, имеет угловой размер $\sim 2^\circ$. Но до стадии рекомбинации различные участки Вселенной, разделенные расстоянием больше чем $900\,000$ световых лет, не взаимодействовали. Это означает, что два участка неба, каждый размером два угловых градуса и разделенные угловым расстоянием 10° , до эпохи рекомбинации никогда не взаимодействовали. В частности, это означает, что в таких участках Вселенной могла быть очень разная температура. До рекомбинации она не могла успеть выровняться. Поэтому было бы естественно ожидать в одном из таких участков неба температуру реликтового излучения, скажем, 3 К , а в другом — 10 К . Однако из наблюдений анизотропии реликтового излучения мы знаем, что температура изотропна с точностью до 10^{-5} . Этот загадочный для фридмановской космологии факт был назван проблемой горизонта. Он был объяснен только в теории инфляционной Вселенной.

Изменение Ω в расширяющейся Вселенной

Наш мир практически плоский. Заметить отличие геометрии нашего мира от евклидовой трудно, для этого необходимы специально поставленные, длительные наблюдения. Они стали возможны только во второй половине нашего века, когда астрономы достигли необходимого уровня наблюдений. Даже на галактических или внегалактических масштабах неевклидовость нашего мира выявляется с трудом. В космологии этот факт называется проблемой плоскостности. Во всей части Вселенной, доступной наблюдению (т. е. внутри горизонта частиц), отличие геометрии от евклидовой незаметно. Мы можем также сформулировать этот факт другим способом, а именно, отношение средней плотности вещества к критической плотности близко к единице. Это отношение обозначается греческой буквой Ω , т. е. можно считать, что $\Omega \approx 1$. Средняя плотность вещества меняется во время эволюции Вселенной, параметр Хаббла, который определяет критическую

плотность вещества, тоже меняется, поэтому параметр Ω является переменным. Если современное нам значение этого параметра обозначить как Ω_0 , то в прошлую эпоху, которая характеризуется красным смещением z , величина параметра Ω была:

$$\frac{1 - \Omega}{\Omega} = \frac{1 - \Omega_0}{\Omega_0} \frac{1}{(1 + z)^n}.$$

Естественно, показатель степени n зависит от скорости расширения Вселенной. Так, для радиационно-доминированной Вселенной $n = 2$ и для Вселенной, доминированной пылью, $n = 1$.

Теперь предположим, что современное значение параметра Ω_0 «почти» равно единице, скажем 0,5, и вычислим значение $\Omega(z)$ для нескольких эпох⁵⁾. Так, в эпоху рекомбинации, которая соответствует красному смещению $z \sim 1\,000$, отличие Ω от единицы составляло всего 0,001. Во время эпохи нуклеосинтеза, при еще больших значениях красного смещения, отличие Ω от единицы составляло 0,000000000000000001. Если же мы посчитаем значение этого параметра в эпоху существования свободных W^\pm и Z бозонов, то для описания отличия Ω от единицы нам пришлось бы писать 26 нулей после точки, отделяющей дробную часть числа.

Такая близость Ω к единице в ранней Вселенной не случайна. Космологи говорят о тонкой настройке этого параметра (по аналогии с точной настройкой приемника на волну радиостанции). Причина такой тонкой настройки параметра плотности была выяснена только в рамках инфляционной Вселенной.

Λ-член в нашей Вселенной

В конце главы необходимо рассказать о том, как изменится эволюция Вселенной, по сравнению с эволюцией, описанной выше, если в нашей Вселенной Λ -член не равен нулю и является положительным.

⁵⁾ Если значение параметра Ω точно равно единице, то во время эволюции Вселенной оно не будет меняться. Такая модель Вселенной называется плоской и ее геометрия соответствует евклидову пространству.

Λ -член был введен в уравнения гравитационного поля самим создателем теории относительности. В 1916 г. А. Эйнштейн написал уравнения общей теории относительности и вскоре начал анализ космологических решений в рамках новой теории. Он искал статические решения. Для получения статического решения (Вселенная, как тогда думали, была статической) необходимо было ввести в уравнения универсальную силу отталкивания, которая уравновешивала бы силы гравитационного притяжения. Так в уравнениях общей теории относительности появилась новая фундаментальная константа, которую Эйнштейн обозначил буквой Λ и назвал космологической постоянной. Положительный Λ -член соответствует универсальным силам отталкивания (отрицательный — дополнительным универсальным силам притяжения).

Подробный анализ показал, что такая космологическая модель хотя и обладает статическими свойствами, но является неустойчивой. Малое изменение плотности приводит к началу необратимой эволюции — Вселенная либо начинает расширяться, либо сжиматься. Созданная несколько позже нестационарная модель Фридмана и открытие расширения нашей Вселенной поставили точку в исследованиях статической картины мира. Про космологическую постоянную забыли.

Вновь про Λ -член вспомнили в конце 60-х годов для того, чтобы объяснить аномалии в распределении гистограммы «красное смещение — видимая звездная величина» для квазаров. Знаменитые советские астрономы Шкловский и Кардашев, а также американские астрономы Солпитер и Петросян ввели в космологическое решение Λ -член так, чтобы расширение имело длительную задержку при определенном значении масштабного фактора. Квазаров, однако, было известно не слишком много, данные сочли неубедительными. Про космологическую постоянную забыли опять...

Вспомнили уже в 1980-х годах после создания А. Гусом теории инфляции в космологии. Надо отметить, что «новая» космологическая постоянная была очень велика. Если Шкловскому и Кардашеву требовалось $\Lambda \approx 2 \cdot 10^{-56} \text{ см}^{-2}$ для объяснения

распределения фотометрических данных о квазарах, то теория инфляции требовала $\Lambda \sim 10^{54} \text{ см}^{-2}$!

Ускорение расширения Вселенной, которое обнаружили астрономы в последнее десятилетие XX века, соответствует положительному значению $\Lambda \sim 10^{-56} \text{ см}^{-2}$.

Что изменится в эволюции Вселенной по сравнению со случаем $\Lambda = 0$, если $\Lambda > 0$?

Меняются все свойства, как кинематические, так и динамические. Физический размер горизонта частиц возрастает так же, как и масштабный фактор, а «лагранжев» размер стремится к постоянной величине. Появляется горизонт частиц будущего. Оказывается, что теперь становится невозможным передать сигнал в будущее, точнее, невозможно передать сигнал наблюдателю, который находится от нас на расстоянии больше, чем размер горизонта. Изменяются оценки возраста Вселенной. Если 90 % общей плотности Вселенной приходится на новый вид материи (Λ -член), а 10 % на обычное вещество, то возраст Вселенной оказывается больше почти в два раза!

Чем больше масштабный фактор, тем больше приливное отталкивание. Мир начинает расширяться неограниченно. Параметр Хаббла не уменьшается со временем, как в моделях Фридмана, а стремится к постоянной величине $H \sim \sqrt{\Lambda}$.

Глава 5

Рождение Вселенной

Рождение Вселенной из пены пространства-времени

Вселенная начинает расширяться из сингулярности. Посмотрим на нее «под микроскопом». Что происходит с пространством-временем, когда расстояние между частицами порядка планковского расстояния? Энергия одной частицы — порядка планковской энергии? Несомненно, для описания этих стадий эволюции Вселенной необходимо было привлекать квантовые представления, необходимо было создавать квантовую теорию гравитационного поля.

В квантовой теории поля одно из основных понятий — это нулевые флуктуации квантов данного поля. Поле в гравитации — метрика пространства времени или сама геометрия. Квантовые флуктуации геометрии называли «пенной» пространства-времени. Такой представляют себе сегодня космологи сингулярность — начало расширения нашей Вселенной.

Рождение Вселенной из квантовых флуктуаций (пространственно-временной пены) должно описываться законами квантовой гравитации. Однако, законы квантовой гравитации пока еще не удастся сформулировать даже на теоретическом уровне. В чем здесь дело?

Квантовая гравитация

Общая теория относительности (ОТО) — релятивистская теория гравитации — принципиально отличается от теории электромагнитного поля и известных полей других видов. ОТО

связывает геометрию пространства-времени со свойствами материи. Поэтому построение квантовой гравитации эквивалентно построению квантовой геометрии пространства-времени. При этом возникает много чисто теоретических (скорее даже формально-математических) трудностей. Не вдаваясь в подробности, перечислим лишь принципиальные трудности:

- является ли наш взгляд на пространство-время в общей теории относительности адекватным при переходе к квантовым представлениям? В частности, как надо трактовать понятие «пространственно-временной» точки?
- имеет ли множество таких точек мощность континуума?
- если так, то является ли такой континуум дифференцируемым многообразием?

Для того чтобы пояснить эти вопросы, напомним читателю основные различия между классическим подходом к описанию физического процесса (скажем, движения частицы) и квантовым подходом к описанию того же процесса.

В классической физике основное уравнение — это уравнение движения, в котором слева стоит произведение массы частицы на ее ускорение, справа — действующая сила. Оно является дифференциальным уравнением, как правило, второго порядка. В начальный момент времени задают положение частицы и ее скорость. После этого, решая дифференциальное уравнение (уравнение движения), можно найти положение частицы и ее скорость в любой момент времени. Другими словами, найти траекторию частицы. В квантовой механике нет понятия траектории частицы. Есть понятие ее волновой функции. Есть понятие вероятности найти выбранную частицу в заданной точке пространства в заданный момент времени. Если читатель захочет найти классическое приближение к траектории, то необходимо будет вычислить так называемое среднее значение координаты частицы по квантомеханическим реализациям. Это среднее значение будет совпадать с классической траекторией. Однако действительное положение частицы не будет совпадать с ней! Один из самых известных физиков нашего времени Ричард Фейман в своих лекциях пояснял

это явление на примере изломанной траектории. Предположим, что мы наблюдаем за движением квантовой частицы невооруженным глазом. Мы видим «толстую» линию, среднее значение которой совпадает с классической траекторией (см. рис. 5.1).

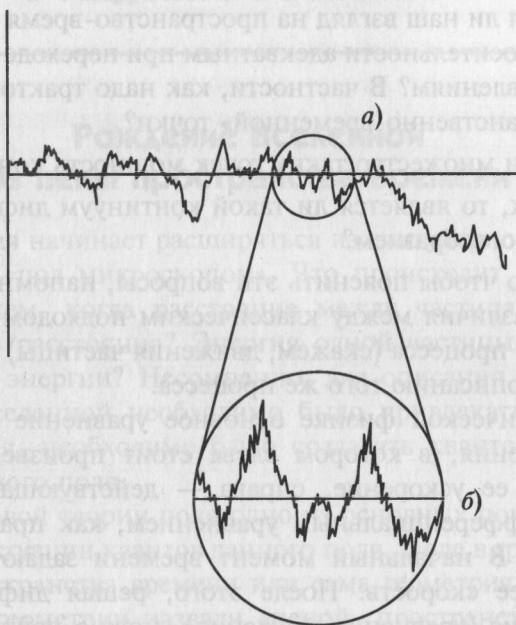


Рис. 5.1. а) Траектория квантовой частицы, видимая невооруженным взглядом; б) траектория той же частицы при увеличении в несколько раз

Вооружимся лупой и обнаружим, что теперь траектория уже не гладкая, она состоит из гладких кусков с изломами. Однако средняя линия, проведенная по этим кускам, совпадает с классической траекторией. Вооружимся микроскопом и будем рассматривать гладкий кусок линии. Тогда мы обнаружим, что он в свою очередь состоит из кусков меньших размеров, тоже гладких, но с изломами. И так до бесконечности. Это означает, что вероятность найти квантовую частицу вне классической траектории не равна нулю, хотя это вероятность очень быстро

стремится к нулю, когда мы пытаемся найти частицу достаточно далеко от классической траектории. Мерой понятия «далеко» здесь является длина волны де-Бройля

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Вероятность нахождения частицы в полосе 2λ вокруг средней траектории почти равна единице. Вероятность найти частицу значительно дальше, чем λ , от средней траектории близка к нулю.

Физики говорят о вероятности найти частицу, математик скажет о недифференцируемости такой траектории. Хотя среднее ускорение частицы в точности равно действующей силе, поделенной на массу (на языке некантовой физики), мгновенное ускорение может быть как угодно велико, точнее, как угодно сильно может отличаться от силы, действующей на частицу.

Итак, в квантовой механике траектория заменяется понятием вероятности найти частицу. В теории поля понятие частицы заменяется понятием величины поля. Оно характеризуется амплитудой, фазой и частотой. В квантовой теории поля амплитуда, фаза и частота какого-либо поля заменяются понятием вероятности тех же величин. В общей теории относительности роль поля играет геометрия пространства-времени. В ней необходимо работать с вероятностью иметь какую-либо геометрию. Но в ОТО геометрия должна быть дифференцируемой, а в квантовой гравитации, как мы видели на примере траектории частицы, это, вообще говоря, не так!

Все эти трудности вызвали к жизни несколько подходов к описанию квантовой гравитации. Беда в том, что различные подходы к квантованию гравитации дают различные результаты.

Поэтому, при описании квантовой стадии эволюции нашей Вселенной используются самые общие идеи о квантовой эволюции Вселенной как целого для того, чтобы получить, по крайней мере, правильные качественные результаты. Укажем несколько из них. Во-первых, полная масса замкнутой Вселенной равна нулю. Это означает, что вся Вселенная может родиться без затрат энергии, т. е. из ничего. Укажем сразу, что закон сохранения энергии в этом случае выполняется. Энергия гравитационно-

го поля является отрицательной величиной, энергия материи является положительной величиной, поэтому полная энергия оказывается равной нулю.

В квантовой теории поля вероятность рождения Вселенной из ничего вычисляется подобно подбарьерному прохождению α -частицы в атомное ядро. Однако, в отличие от ядерной физики, корректное вычисление вероятности рождения Вселенной удастся в весьма специфическом случае.

Космологи называют этот случай решением де Ситтера. Точнее, удалось вычислить вероятность перехода от $a = 0$, т.е. космологической сингулярности к $a = H^{-1}$ за конечное время τ . В $a = 0$ была сингулярность, до нее Вселенная существовала в виде пространственно-временной пены, а к концу квантового процесса появилась однородная и изотропная геометрия с масштабным фактором $a = H^{-1}$. Конечно, наиболее вероятно рождение Вселенной с радиусом кривизны порядка планковского размера $R_{\text{pl}} \sim 10^{-33}$ см.

Планковские единицы

Здесь уместно отступление о планковских единицах. После того, как Макс Планк ввел в физику новую фундаментальную постоянную, теперь носящую его имя, \hbar , стало очевидно, что из нескольких фундаментальных постоянных: постоянной \hbar , играющей основную роль в квантовой физике (квант действия), ньютоновской гравитационной постоянной G , скорости света c можно сформировать естественные единицы, имеющие все три физические размерности — длины, времени и массы. Поскольку они являются важными в нашем изложении, перечислим их:

$$\bullet \quad l_{\text{pl}} = \frac{\hbar G}{c^3} \approx 1,6 \times 10^{-33} \text{ см},$$

$$\bullet \quad t_{\text{pl}} = \frac{l_{\text{pl}}}{c} \approx 5,3 \times 10^{-44} \text{ с},$$

$$\bullet \quad m_{\text{pl}} = \frac{\hbar c}{G} \approx 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ г},$$

а также производные от них: единицы энергии, плотности и температуры:

$$\bullet E_{\text{пл}} = m_{\text{пл}} c^2 \approx 2,0 \times 10^{16} \text{ эрг} \approx 1,2 \times 10^{19} \text{ ГэВ},$$

$$\bullet \rho_{\text{пл}} = \frac{m_{\text{пл}}}{l_{\text{пл}}^3} \approx 5,2 \times 10^{93} \text{ г/см}^3,$$

$$\bullet T_{\text{пл}} = \frac{E_{\text{пл}}}{k} \approx 1,4 \cdot 10^{32} \text{ К}.$$

Правильно выбранные единицы являются мощным инструментом в изучении природы. Они позволяют провести размерный анализ явления и оценить по порядку величины его масштаб, не проводя точного численного решения задачи. Для неспециалиста в космологии самыми естественными физическими единицами являются единицы СИ или СГС, которые по порядку величины совпадают с хорошо знакомыми человеку масштабами (1 кг, 1 м и 1 с). Однако для космологов, особенно работающих в области космологии ранней Вселенной, планковские единицы являются значительно более естественными, чем, например, СГС единицы.

Многие уравнения, с которыми космологи работают при описании ранней Вселенной, записаны в планковских единицах, что значительно упрощает запись и позволяет вычленять физический смысл задачи.

Продолжим обсуждение процесса рождения Вселенной.

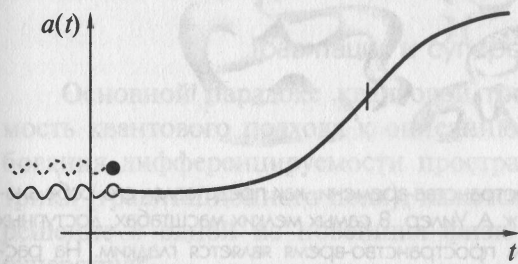


Рис. 5.2. Показана эволюция масштабного фактора со временем. Волнистой линией показана область квантовой эволюции Вселенной. Сплошной линией показана область квазиклассической эволюции и выход на инфляционную стадию

На рис. 5.2 схематически представлена зависимость a (масштабного фактора) от времени. Слева от оси ординат (при $t < 0$) находится классически запрещенная область, масштабный фактор в этой области испытывает сильные флуктуации,

которые представляют из себя флуктуации пространства-времени. Ее условно назвали «ничто». В ней классическое пространство-время не существует, аналогично тому, как не существует классической траектории α -частицы (обычной ядерной частицы) во время туннельного перехода.

Слева от вертикальной оси геометрия пространства-времени испытывает сильные флуктуации. Возможно даже, что временная последовательность каких-либо событий в мире и сам их смысл претерпевает изменение в пространственно-временной пене. Читатель может возразить, что существуя такие явления на самом деле, они давно были бы обнаружены. Это правильно, если бы эти события разыгрывались на привычных нам пространственно-

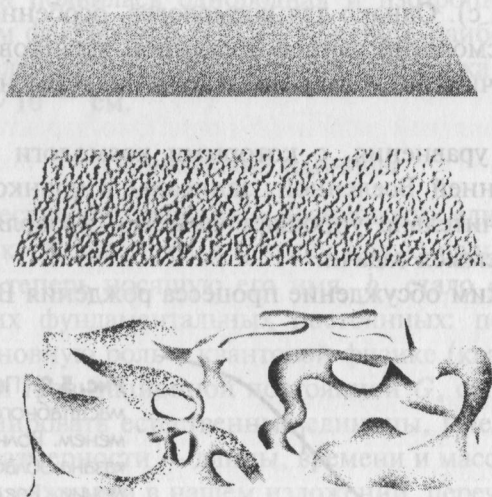


Рис. 5.3. Квантовый вакуум пространства-времени, как представлял его себе знаменитый американский физик Дж. А. Уилер. В самых мелких масштабах, доступных современной физике, 10^{-16} см пространство-время является гладким. На расстояниях порядка 10^{-30} см начинают проявляться первые предвестники волнения, поверхность плоскости, изображающей четырехмерное пространство-время, становится неровной, на ней появляется рельеф. На масштабах в тысячу раз меньше кривизна и даже сама топология пространства-времени сильно флуктуируют. Это похоже на волнуемое море. Свысока мы не видим отдельных волн; опускаясь ниже, замечаем волны, затем барашки; вглядываясь более пристально, замечаем структуру «барашков» и отдельные капли

временных масштабах. Однако, эффекты квантовой гравитации должны проявляться только на исключительно малых — планковских масштабах пространства и времени.

До сих пор физики имели дело с масштабами не меньше, чем 10^{-16} см (комптоновская длина волны частицы, разогнанной в самом мощном из современных ускорителей элементарных частиц). Отношение этого масштаба к планковскому масштабу, где должны быть уже значительными эффекты квантовой гравитации, превышает 10^{17} . Это отношение равно отношению длины человеческой руки от ладони до локтя к расстоянию до ближайшей звезды. Естественно, что, работая с такими «грубыми» измерительными инструментами, физики не могли заметить процессы, происходящие на масштабах 10^{-33} см.

Представим себе полет на самолете. Далеко внизу сплошной зеленый однородный ковер. Вот самолет опускается ниже, и мы видим лес, начинаем различать отдельные деревья, видим, что они стоят и поверхность внизу не является гладкой. Самолет садится, мы приходим в лес и поражаемся высоте деревьев, а также тому впечатлению гладкости этого ландшафта, которое было в полете.

Так же и эффекты квантовой гравитации производят видимые искажения геометрии пространства-времени только тогда, когда мы можем «различать» масштабы порядка планковской длины 10^{-33} см (см. рис. 5.3).

Гравитация и суперструны

Основной парадокс квантовой гравитации — несовместимость квантового подхода к описанию полевых величин и требования дифференцируемости пространственно-временной метрики (гравитационного поля), кажется, начинает находить свое решение в одной из новейших физических теорий — теории суперструн.

В этой теории элементарные частицы представляются в виде одномерного объекта, похожего на струну. Протяженный объект может колебаться подобно гитарной струне, звуки, которые издает струна при возбуждении (скажем, щипке), определяют ее натяжением и размерами. Частота колебаний определяет

высоту звука. Так же и в суперструнах. Существуют моды колебаний суперструн, частота каждой моды определяет частицу и ее энергию. Известные частицы интерпретируются как различные моды колебаний единой струны.

Теория суперструн обладает также суперсимметрией — симметрией, объединяющей частицы с целым спином (к примеру, фотоны) и полуцелым спином (например, электроны) в единую схему. Вообще говоря, с точки зрения физиков, которые занимаются теорией суперструн, она обладает массой достоинств и практически лишена недостатков. С точки зрения других специалистов, у этой теории есть существенный недостаток — ее невозможно (по крайней мере пока) проверить экспериментально в лаборатории. Нельзя в лаборатории — может быть можно проверить, наблюдая Вселенную? Одно из активно развиваемых сейчас приложений теории суперструн — это исследование (теоретическое) их возможных проявлений в ранней Вселенной и в предельных черных дырах — объектах с максимальным гравитационным полем.

Размер (продольный) у одной суперструны мал, он порядка планковского размера 10^{-33} см. Поэтому с точки зрения современной экспериментальной физики суперструны представляют из себя точечные объекты. Гравитация включается в теорию суперструн естественным образом, как одна из степеней свободы. Поскольку для нашего изложения важно, как именно получается гравитационное взаимодействие из теории суперструн, остановимся на этом специально.

Общая теория относительности, которая в теории суперструн является всего лишь одним из взаимодействий, допускаемых этой теорией, описывает гравитационное поле как искривленный четырехмерный пространственно-временной континуум. Наличие масс определяет кривизну пространства, сами массы движутся в таком пространстве по линиям минимальной длины — геодезическим. Гравитационные уравнения определяют не только структуру пространства, но и движение материи в нем.

В теории суперструн взаимодействия действуют в мире, расширенном до большего числа измерений, например, до девяти пространственных измерений и одного временного. Ясно, что

шесть пространственных измерений должны быть «скрыты» от наблюдателя. В обычных условиях мы не должны замечать присутствия дополнительных измерений. Они являются «свернутыми».

Поясним сказанное на рисунке. Представим себе бублик (рис. 5.4). В геометрии такая фигура называется тором. У тора есть два радиуса. Первый — «большой», это радиус окружности A . Второй радиус меньшего размера, это радиус окружности B . Пусть отношение этих радиусов велико, скажем 10^{60} ; радиус окружности A составляет 10^{30} см, а радиус окружности B составляет 10^{-30} см. Тогда существу, обладающему достаточно большими размерами, скажем, порядка 1 м, и живущему на поверхности тора, будет казаться, что тор одномерен. Это существо просто не сможет «протиснуться» в дополнительное измерение.

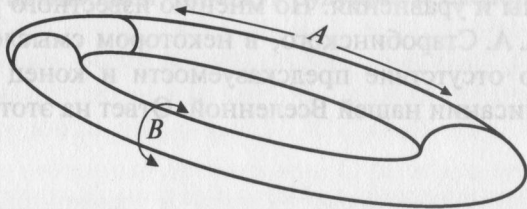


Рис. 5.4. На рисунке изображен тор («бублик»). Поверхность тора — это двумерное искривленное пространство. В отличие от сферы тор обладает другой топологией. Двумерный житель на такой поверхности обнаружит, что движения в двух направлениях неэквивалентны. Одно направление на торе эквивалентно движению по окружности A с большим радиусом, второе по окружности B с меньшим радиусом

Так же и в мире, который описывается теорией суперструн, дополнительные шесть измерений «маленькие» и «свернутые». Три измерения большие, заведомо больше чем 10^{28} см, а шесть имеют радиус кривизны не больше чем 10^{-17} см, а скорее 10^{-33} см.

В таком мире взаимодействий гораздо больше, чем в привычном нам четырехмерном мире. Многие из них можно отождествить с привычными нам частицами и полями.

Теория суперструн еще очень далека от завершения. Может быть, после построения этой теории физики, наконец, получат

теорию, которая является универсальной. Имя для такой теории уже придумали: «Теория всего на свете»; английская аббревиатура этого выражения есть TOE (Theory of Everything).

Основной вопрос к теории суперструн — структура космологической сингулярности (по крайней мере в рамках этой, пусть еще и не доказанной теории) — не решен. Существует ли стационарное образование, которое можно ассоциировать с вакуумным состоянием в этой теории? Ответ на этот вопрос пытаются дать некоторые исследователи. С периодом в несколько лет ответ меняется на противоположный. Происходит так не потому, конечно, что исследователи не слишком старательны, а потому, что проблема является исключительно трудной для решения.

Почему многие космологи считают, что сингулярности необходимо избегать? В сингулярности не применимы любые физические законы и уравнения. По мнению известного российского космолога А. А. Старобинского, в некотором смысле, сингулярность — это отсутствие предсказуемости и конец физических методов в описании нашей Вселенной. Ответ на этот вопрос свя-

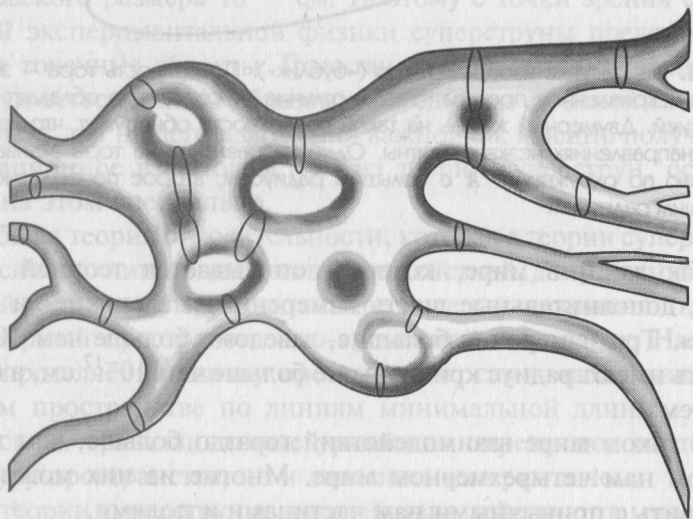


Рис. 5.5. Представление художника о структуре пространства-времени в теории суперструн

зан в большей степени с общечеловеческими, а не с физическими соображениями. Если наша Вселенная родилась из сингулярности, значит, есть момент творения, значит, существовал творец. Если Вселенная может находиться в стационарном состоянии (которое описывается, например, теорией суперструн) как угодно долго, а начало процесса расширения — распад из сверхплотного состояния (с плотностью, давлением и температурой порядка планковской или даже выше), аналогичный α -распаду ядра, то гипотеза творца является излишней. Однако, повторяю, что проблема остается нерешенной.

По современным представлениям пространство-время в планковских масштабах представляет из себя фантастическую фигуру, больше напоминающую монстра из фильмов ужасов, чем объект физических исследований (см. рис. 5.5). Является ли эта картина правильной, покажут будущие исследования.

Физика элементарных частиц и космология

В последующих главах мы перейдем к описанию эволюции нашей Вселенной после момента ее рождения. Для этого нам понадобятся некоторые понятия современной физики.

В квантовой механике после «выхода» α -частицы в классически разрешенную область можно пользоваться классическим описанием ее движения. Точно также после «рождения Вселенной из ничего» можно пользоваться некантованной общей теорией относительности для описания эволюции масштабного фактора.

Хотя геометрические свойства Вселенной являются уже хорошо знакомыми классическими величинами, физические характеристики вещества сразу после окончания квантовой стадии эволюции Вселенной, конечно, менее определены, чем геометрические. Здесь следует сделать несколько замечаний о физике. Долгое время основным методом познания в физике был эксперимент. Теоретическая физика существовала, чтобы на его основе построить некоторую модель нашего мира. Даже в начале нашего столетия такие абстрактные теории, как квантовая механика и специальная теория относительности, родились из потребностей эксперимента. Развитие этих теорий (в частности, создание общей теории относительности) быстро обогнало возможности технологии того времени, и только в конце двадцатого века стала возможна экспериментальная проверка наиболее важных предсказаний общей теории относительности и квантовой физики, которые были сделаны почти сто лет назад. Современная теоретическая физика (теория элементарных частиц) далеко оторвалась

от возможностей экспериментальной физики. Можно сказать, что традиционный метод изучения свойств элементарных частиц — исследование их на ускорителях — позволяет изучать свойства частиц при энергиях ~ 1 ТэВ (тераэлектронвольт = 1 эрг), в то время как физики-теоретики смело оперируют с энергиями порядка 10^{19} ГэВ $\approx 10^{16}$ эргов на одну частицу.

Космологическая модель Фридмана, описанная в главе 4, выдержала проверку временем и наблюдениями. Однако, как и во всякой теории, в ней осталось много нерешенных проблем. Некоторые проблемы являлись экспериментальными, они должны были быть решены в процессе роста наблюдательного мастерства и технологии, другие проблемы являлись чисто теоретическими. Последние всегда являются более важными, поскольку бросают вызов интеллекту специалистов-космологов. Для их решения не нужно строить безумно дорогие экспериментальные установки, собирать тысячи специалистов для работы над одной проблемой. Зачастую бывает достаточно одного, но гениального исследователя.

Подобные проблемы были и в космологии. Они назывались метафизическими проблемами. С решения метафизических проблем космологии и возникла теория инфляции.

Теория инфляционной Вселенной возникла в 1981 г., с опубликования в печати работы Алана Гуса «Инфляционная Вселенная: возможное решение проблемы горизонта и плоскостности». Такое несколько длинное название носит статья, заложившая основы современной космологии ранней Вселенной, статья, которая, похоже, является одной из самых цитируемых работ по физике и астрономии двадцатого века. Она была опубликована в январе 1981 г. Уже спустя год, было осознано, что эта статья решает не только те вопросы, которые перечислены в ее оглавлении, но и проблемы спектра космологических возмущений, а также отвечает на многие фундаментальные вопросы современной космологии. Начало восьмидесятых годов — это настоящий «инфляционный» бум в теоретической космологии. Начало девяностых годов принесло первые экспериментальные подтверждения теории инфляции, теории ранней Вселенной. Более того, стало понятным, что космология, особенно экспериментальная космология,

может служить обширной лабораторией для проверки теорий элементарных частиц в условиях космоса, поскольку зачастую невозможно проверить эти теории в условиях земных лабораторий.

Надо сказать, что идеи, высказанные в статье А. Гуса, как говорится, «носились в воздухе». Схожие идеи были высказаны за десять лет до ее выхода в свет советскими космологами Глине-ром и Дымниковой, более того, за несколько лет до статьи А. Гуса А. Старобинский построил модель, чрезвычайно похожую на инфляционную модель Вселенной. В. Рубаков за несколько месяцев до А. Гуса опубликовал препринт, в котором дал правильное решение проблемы энтропии. История эта, несомненно, поучительна. Правильно подобранное слово «инфляция», правильная формулировка всех проблем решили судьбу статьи, привлекли к ней огромное внимание, и сейчас принято считать, что теория ранней Вселенной берет свое начало именно со статьи А. Гуса.

Однако понять идеи, лежащие в основе теории ранней Вселенной, невозможно без основательного рассказа о концепциях, формирующих фундамент современной теории элементарных частиц. Область эта настолько необъятная, а автор ни в коем случае не может считать себя экспертом в ней, что приходится рекомендовать читателю для более близкого знакомства с предметом замечательную книгу [6] российского физика, посвященную теории элементарных частиц. Тем не менее, несколько слов о физике элементарных частиц здесь необходимо сказать. Автор постарается излагать основные идеи на уровне восприятия, как говорится, «для пешехода», но полностью избежать рассказа о новой физике нельзя, поскольку без этого будут непонятны основные идеи инфляционной Вселенной.

Поиски единства взаимодействий и элементарных частиц в физике

Одной из главных задач физики всегда был поиск «самых-самых» элементарных частиц материи и единое описание их взаимодействий. Одно из главных условий, которому должны были удовлетворять элементарные частицы — стабильность, второе —

элементарная частица не могла быть составлена из более мелких частиц. По мере продвижения на более глубокие уровни описания Природы и Вещества сама концепция элементарности и единства изменялась.

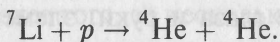
Вначале, когда для исследования структуры вещества человек мог применять только средства, предоставленные ему природой — собственные глаза и руки, элементарными частицами считались атомы. В древнем мире, греческим ученым Демокритом была введена концепция атомов, которые считались неделимыми. В прошлом веке была построена классификация атомов в виде таблицы Менделеева, которая обобщала известные химические знания о взаимодействиях между различными элементами и классифицировала сами элементы. В химии считалось, что элементы являются первочастицами природы, и они неделимы.

Можно смешать водород и кислород, поджечь их, при этом в результате химической реакции образуется вода. Можно добавить эту воду к железу, образуется ржавчина. Но несмотря на такие существенные изменения, в них принимают участие только три вида атомов: водород, кислород и железо. Никакими способами, доступными химикам и физикам прошлого века, невозможно было превратить кислород в железо или водород, скажем, в литий. Нагревание, сжатие, взрыв, пропускание электрического тока — все эти процессы меняли соединения атомов между собой, но сами атомы оставались неизменными.

Так было, пока не открыли нестабильные атомы, пока не открыли явление радиоактивности.

Резерфорд вместе со своим сотрудником Содди открыл спонтанное превращение химических элементов. Изучая радиоактивные элементы, физики обнаружили, что при радиоактивном распаде меняются свойства атомов — появляются новые химические элементы, которые отсутствовали в первоначальном веществе. Так было открыто спонтанное (самопроизвольное) деление или распад атомов. Атом урана при распаде исчезает и дает два атома: один атом легкий (альфа-частица) — это атом гелия, второй тяжелый — это атом тория. Атом тория тоже является нестабильным относительно распада.

Позже Резерфорд и его сотрудники построили первый ускоритель, на котором удалось провести искусственное расщепление атомного ядра. В результате «обстрела» мишени, состоящей из металлического лития, ускоренными атомами водорода (протонами), происходила атомная реакция — литий распадался, порождая два атома гелия:



Еще в конце прошлого века, до открытий Резерфорда, Томсон открыл первую элементарную частицу — электрон, а уже в нашем веке сам Резерфорд с сотрудниками в результате своих экспериментов выяснили, что атом является сложной структурой, состоящей из элементарных частиц (протонов и нейтронов).

В 1932 г. на роль элементарных частиц (тех «самых-самых») претендовали электрон, протон и нейтрон.

Сегодня мы знаем, что только электрон может претендовать на звание элементарной частицы, тогда как протон и нейтрон состоят из других элементарных частиц — кварков. В нашем веке руки физиков были вооружены мощными машинами для исследования основ материи — ускорителями элементарных частиц. Ускорители были необходимы физикам для того, чтобы рассматривать все более и более мелкие масштабы. Дело в том, что для исследования меньших масштабов необходимы все более высокие энергии. Так, исследование структуры молекул (ее внешних частей) можно проводить с помощью микроскопа, с помощью видимого света; для исследования атома водорода уже необходимо использовать ультрафиолетовые лучи, фотоны которых в несколько раз более энергичны, чем фотоны видимого света, их энергия составляет несколько электронвольт (эВ). Для исследования структуры орбит внутренних электронов в атоме, например, железа, уже необходимо использовать рентгеновские лучи, энергия которых составляет несколько килоэлектронвольт (кэВ).

В дальнейшем продвижении по шкале энергий физикам помогли сами элементарные частицы — электроны и протоны, которые могли быть ускорены в машинах физиков (ускорителях элементарных частиц) до мегаэлектронвольт (МэВ), а теперь и гигаэлектронвольт (ГэВ) и даже вплоть до тераэлектронвольт (ТэВ).

По мере наращивания мощности ускорителей открывались все новые знания о структуре материи. Были открыты многие новые частицы, которые, однако, были нестабильными. Позже физики выяснили, что все эти частицы являются составными — они представляют связанные состояния из нескольких кварков, а некоторые также и лептонов. Так протон — пример одной из самых легких систем, состоящей из трех кварков, антипротон соответственно состоит из трех антикварков. Более тяжелое объединение трех кварков называется нейтроном, частица уже является нестабильной, хотя время полураспада является вполне макроскопическим, оно составляет примерно 10 минут. Частицы, которые состоят из трех кварков, называли барионами. В дальнейшем мы посвятим целую главу барионам во Вселенной, генерации бариозаряда во Вселенной.

Самые легкие кварк и антикварк формируют семейство пионов, физики обозначают их π^+ , π^- , π^0 . Пионы являются нестабильными частицами, более того, все остальные составные частицы, которые тоже являются возбужденными состояниями из кварков, нестабильны. Естественно, пионы, которые состоят из кварка и антикварка, «живут», пока кварк и антикварк не аннигилируют. В зависимости от типа кварка (и антикварка соответственно) продуктами распада будут фотоны и электрон или позитрон, сопровождаемые антинейтрино или нейтрино.

Сейчас кандидатами на роль элементарных частиц являются кварки, а также лептоны.

Лептоны — это частицы, которые не участвуют в сильных взаимодействиях, в отличие от кварков.

Физики, конечно, понимают, что может существовать целый скрытый пока от нас уровень строения материи. В этом случае элементарные частицы кварки и лептоны являются составными образованиями, которые представляют собой кластеры более фундаментальных частиц.

В табл. 6.1 представлены элементарные частицы. Естественно, элементарными они считаются на современном уровне знания. Тем не менее, они удовлетворяют понятию «элементарность». Они являются стабильными и из них состоят все осталь-

Таблица 6.1

Фундаментальные элементарные частицы

кварки	заряд = $\frac{2}{3}$	u	c	t
	заряд = $-\frac{1}{3}$	d	s	b
лептоны	заряд = 0	ν_e	ν_μ	ν_τ
	заряд = -1	e	μ	τ
номер поколения		1	2	3

ные известные частицы. В этот список входят кварки и лептоны, которые объединены в три поколения.

Наше вещество, протоны и нейтроны, а также химические элементы, которые они составляют, состоят только из частиц первого поколения. Это два кварка — «верхний» и «нижний», электрон и электронное нейтрино. Остальные четыре кварка, мюон и тау-лептон, а также мюонное нейтрино и тау-нейтрино составляют второе и третье поколения элементарных частиц.

Перечислим все элементарные частицы. Существует шесть типов кварков; они называются соответственно «верхний» и «нижний», «очарованный» и «странный», «t-кварк» и «b-кварк». Соответственно, нейтральные лептоны называются «электронное нейтрино», «мюонное нейтрино», «тау-нейтрино», а заряженные лептоны называются «электрон», «мюон» и «тау-лептон». Разумеется, каждая из упомянутых частиц имеет античастицу.

Все перечисленные элементарные частицы обладают полуцелым спином. Спиновая характеристика элементарных частиц появилась в квантовой механике — механике, которая описывает движение и взаимодействия в микромире. Все частицы делятся на две большие группы. У одних спин является полуцелой величиной ($\frac{1}{2}$ и $\frac{3}{2}$), у других — целой (0, 1, 2).

Частицы, обладающие полуцелым спином, называются фермионами и подчиняются статистике, открытой Э. Ферми. Две частицы не могут занимать одно и то же положение в фазовом

пространстве. Такие частицы являются аналогами твердых тел в классической механике. Твердые тела тоже не могут занимать одно место в обычном пространстве.

В классической физике существуют объекты, которые, однако, могут занимать одно место в пространстве. Это, например, звуковые волны. Две волны разной частоты и амплитуды могут одновременно проходить одну точку пространства. Они, конечно, взаимодействуют. Это взаимодействие не мешает им проходить данную точку, такое взаимодействие называется интерференцией волн. Каждый наблюдал это явление на примере волн, бегущих по воде от кильватера лодки или корабля. Два цуга волн находят друг на друга, интерферируют и двигаются дальше.

Аналоги таких объектов существуют и в мире элементарных частиц. Они называются бозонами, подчиняются статистике Бозе—Эйнштейна и являются частицами с целым спином (0, 1, 2). Они обеспечивают взаимодействия между лептонами и кварками.

Начнем их (бозонов) перечисление с частиц, которые обеспечивают взаимодействие между кварками. Они называются глюоны, от английского слова «glue», что означает клей. Восемь глюонов обеспечивают существование ядерных сил, которые сдерживают кварки в протоне и нейтроне, а также, на более высоком уровне возбуждения, протоны и нейтроны внутри атомного ядра.

Есть бозоны, которые называют вионами, обозначая их W^{\pm} и Z . Эти бозоны обеспечивают слабые взаимодействия в нашем мире, они управляют β -распадом ядра и испусканием нейтрино.

Фотон — следующий пример бозона. Фотоны — наиболее известные из всех элементарных частиц. Свет — это набор фотонов, они переносят изображение и звук в наших телевизорах и радиоприемниках, они обеспечивают устойчивость биомолекул, а следовательно, наших организмов.

Итак, незаметно мы подошли к частицам, которые обеспечивают физические взаимодействия.

Электродинамика описывает электромагнитные взаимодействия. Удалось объединить в одну теорию описание электромагнитных и слабых взаимодействий, отвечающих за β -распад ядра; теперь этот тип объединенных взаимодействий физики

называют электрослабым взаимодействием. Частицы, которые несут «заряд»¹⁾ этих сил — лептоны, взаимодействие переносится фотонами, W^\pm -бозонами и Z -бозонами. Повторим, что лептоны имеют спин, равный $\frac{1}{2}$, фотоны, W^\pm -бозоны и Z -бозоны имеют спин, равный 1.

Ядерные силы пока не удалось объединить с электрослабым взаимодействием; точнее, теоретические схемы объединения написаны, но вот проверить их экспериментально пока невозможно. Ядерные силы называют также квантово-хромодинамическими взаимодействиями.

Заряд хромодинамических взаимодействий «спрятан» в кварках, он называется в отличие от электрического цветовым зарядом, а сами взаимодействия переносятся глюонами, частицами, которые имеют спин 1.

Успехи объединения слабых и электромагнитных взаимодействий побудили физиков искать более общие теории, объединяющие также и хромодинамическое взаимодействие. Видимо, одна из теоретически возможных схем объединений электрослабого и хромодинамического взаимодействия будет доказана в будущем.

Остается еще одно взаимодействие, с исследования которого началась современная физика и которое пока не удастся включить в объединенную схему. Это гравитационное взаимодействие. «Зарядом» гравитационного взаимодействия является масса — самое универсальное свойство материи. Переносчиком взаимодействия является гравитационное поле — метрическое поле, описываемое тензором второго ранга и обладающее спином 2.

В многочисленных попытках объединения различных взаимодействий в единую теорию возникают дополнительные поля и частицы, которые никогда не наблюдались в природе. Тем не менее, успехи объединения электрослабых взаимодействий и описания хромодинамических взаимодействий заставляют нас признать мощь методов, которые для этого использовались —

¹⁾ Слово заряд в данном месте обозначает как обычный электрический заряд, который несет электрон, так и иные заряды, которые несут лептоны других типов.

принципы симметрии в описании взаимодействий. Подробнее об этом будет написано чуть ниже.

Развивая этот подход к объединению электрослабых и хромодинамических взаимодействий в единую схему, физики получают много дополнительных полей и частиц.

Одним из самых важных, которое появляется в любых схемах объединений, является скалярное поле.

Что такое скалярное поле?

Теория инфляции представляет из себя синтез фридмановской космологии с принципиально новым уравнением состояния материи. Это уравнение состояния типа фальшивого вакуума. Время, когда доминировал этот вид материи, называется эпохой доминирования скалярного поля, а также инфляционной эпохой.

Скалярное поле — это первое поле, которое появилось в физике. Ввели его для описания гравитации. Поле обладало универсальным взаимодействием, скорость распространения которого равнялась бесконечности. Уже в нашем веке было показано, что гравитационное поле описывается другими величинами. Для описания гравитации скалярное поле не пригодилось.

Идея, однако, не умерла. Скалярное поле «воскресил» японский физик Х. Юкава. Он предположил, что ядерные взаимодействия описываются скалярным полем, которое обладает массой. Наличие массового члена, как говорят физики, приводит к тому, что эффективный радиус взаимодействий определяется масштабом, обратно пропорциональным массе поля:

$$l \approx \frac{100 M_{\text{ЭВ}}}{m} 10^{-13} \text{ см.}$$

Физики назвали частицы этого поля мезонами. Из параметров ядерных взаимодействий удалось определить масштаб взаимодействий, а, следовательно, массу частиц, квантов поля. Действительно, вскоре, при экспериментах на ускорителях, частицы с предсказанной массой были обнаружены. Но они не являлись переносчиками ядерных взаимодействий! Несколько позже «правильные» частицы были открыты. Они получили название π -мезонов.

Однако, π -мезоны не были квантами скалярного поля. Они были квантами псевдоскалярного поля. Отличие одного поля от другого в том, что при пространственном отражении скалярное поле не меняется, а у псевдоскалярного поля меняется знак.

О скалярном поле забыли. Но ненадолго. Оно вернулось, когда физики начали разрабатывать фундаментальные вопросы элементарных частиц, для описания состояния материи при энергиях, превышающих ~ 100 ГэВ.

Расскажем немного об этом.

Перенормировки в теории элементарных частиц

Основные идеи квантовой механики оказались настолько универсальными, что физики для правильного описания природы были вынуждены создавать квантовую теорию поля. Вначале была создана квантовая теория электромагнитного поля, появилось понятие фотона — кванта электромагнитного излучения. Одновременно с созданием квантовой теории электромагнитного поля и электромагнитных взаимодействий в физике появилось понятие физического вакуума — моря виртуальных частиц. В отличие от виртуальной реальности сегодняшних компьютеров эти виртуальные частицы проявляли себя несколько странным образом. Они как бы и не взаимодействовали с внешним миром, переопределяя только массы элементарных частиц, заряды и собственные моменты²⁾. Есть, правда, еще одно свойство у этого вакуума. В каждой точке физического пространства-времени содержалось бесконечно много виртуальных частиц и все они весили бесконечно много. Это должно было проявляться в виде гравитационного взаимодействия, вакуум должен был весить бесконечно много. Поскольку этого взаимодействия никто не наблюдал, то проблему бесконечной массы либо обходили молчанием, либо приговаривали, что она не является физической

²⁾ Запомним это. Переопределение массы, заряда и момента означает, что константы классической физики меняются, хотя бы и под воздействием некоего эфемерного вакуума.

и, конечно, эта проблема будет решена в будущей физической теории. Оговоримся сразу, что замолчать эту проблему не удалось, и сегодня она является проблемой номер один теоретической физики элементарных частиц. Ее также называют проблемой динамической генерации лямбда-члена.

В теории квантовой электродинамики для вычисления масс и зарядов элементарных частиц, которые являются параметрами взаимодействий, придумали процедуру перенормировки, которая позволяла получать конечные ответы при вычислениях с бесконечными величинами. Это был триумф квантовой электродинамики!

Однако, уже к моменту создания квантовой электродинамики, т. е. квантовой теории электромагнитных взаимодействий, было известно уже, по крайней мере, еще три фундаментальных взаимодействия. Перечислим их. Это прежде всего гравитационное взаимодействие. Это взаимодействие было известно давно, задолго до открытия квантовой теории и даже электромагнетизма. В двадцатом веке стало известно еще два взаимодействия: слабое и сильное. Слабое взаимодействие ответственно за реакции с участием нейтрино — невесомой частицы, которая взаимодействует с окружающим веществом настолько слабо, что может проникнуть сквозь Землю, ни разу не провзаимодействовав с атомами Земли. Сильное взаимодействие — это ядерные силы, те силы, которые сдерживают протоны и нейтроны внутри ядра. Ядро стабильно, несмотря на то, что все протоны имеют положительный заряд и должны были бы в отсутствие ядерных сил разлететься в разные стороны. Эту стабильность обеспечивают ядерные силы.

В электродинамике было введено понятие заряда — носителями заряда были элементарные частицы — электроны (отрицательный заряд) и протоны (частицы с положительным зарядом). Протоны и электроны обладали массой; масса электрона составляла — 0,5 МэВ, масса протона — 1 ГэВ. Перенос сил обеспечивали безмассовые частицы — фотоны. Силы пропорциональны количеству зарядов, прямо пропорциональны числу электронов и протонов. Прямая пропорциональность возникает, поскольку электродинамика — линейная теория. Силы, обладающие другой природой — нелинейные.

В ядерных силах такими зарядами являются кварки, а силы переносятся глюонами. Заряд в ядерных взаимодействиях называется не электрическим, а цветовым, а сами взаимодействия называются хромодинамическими; так же будем называть их и далее, поскольку термин «ядерные взаимодействия» на самом деле является описательным и имеет больше историческое значение. В отличие от электродинамики теория ядерных взаимодействий — нелинейная теория. Глюон — аналог фотона в электродинамике — может взаимодействовать сам с собой, поскольку он несет цветовой заряд. Кварки и глюоны обладают массой.

В теории слабых взаимодействий аналогом электронов являются нейтрино, а аналогом фотонов — частицы, которые называют W^\pm -бозоны и Z -бозоны. Это массивные, заряженные частицы с массой, равной примерно 100 ГэВ.

При разработке квантовой теории слабых взаимодействий и квантовой хромодинамики выяснилось, что хорошо разработанная в квантовой электродинамике процедура перенормировки в этих теориях не работает.

Основная причина неудачи заключалась в том, что частицы — переносчики взаимодействий — обладали массой.

Механизм Хиггса, новое скалярное поле

Для решения этой проблемы был придуман механизм динамической генерации масс элементарных частиц. Он был назван по имени физика-теоретика, который его придумал. Сейчас физики называют его механизмом Хиггса.

Основная идея, лежащая в процедуре динамической генерации массы, заключается в предположении о том, что поля взаимодействуют нелинейно, что частица, изначально безмассовая, приобретает массу из-за взаимодействия с конденсатом некоторого скалярного поля.

Конденсат скалярного поля — это специальный термин, который появился в физике после создания квантовой теории поля. Физики выяснили, что все элементарные частицы можно разбить на две большие группы, разделенные по величине спина. Как уже упоминалось, одни частицы обладали целым спином

и назывались бозонами, вторые обладали полуцелым спином и назывались фермионами.

При взаимодействиях каждый фермион занимал «свою полочку». Они обязательно должны были отличаться по своим характеристикам: либо энергетическим, либо пространственным. Два фермиона с одинаковыми импульсами, скажем, не могли занимать одинаковое положение в фазовом пространстве. Фазовое пространство в отличие от обычного дополнено еще характеристиками энергии частицы.

Наоборот, взаимодействующие бозоны стремятся занять одно положение в фазовом пространстве и обладать одинаковыми энергетическими характеристиками. Физики говорят, что образуется бозонный конденсат.

Конденсат скалярного поля по всем основным характеристикам подобен вакууму виртуальных частиц. Поэтому он называется состоянием вакуума скалярного поля. Само поле — нелинейное, оно взаимодействует само с собой и потенциальная энергия взаимодействия в зависимости от величины поля представляет сложную функцию. На рис. 6.1 показана зависимость энергии скалярного поля от величины поля.

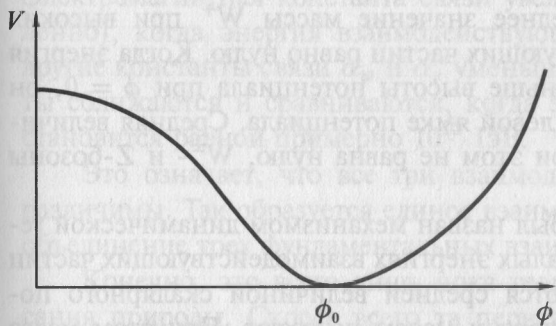


Рис. 6.1. График потенциальной энергии скалярного поля в зависимости от величины самого поля. По вертикальной оси отложена величина потенциальной энергии, по горизонтальной оси — величина поля

Обратим внимание, что график зависимости $V(\phi)$ имеет две точки, в которых касательная к графику параллельна горизонтальной оси: первая точка $\phi = 0$, вторая $\phi = \phi_0$.

У физического состояния, которое описывается потенциальной энергией такого типа, есть два состояния равновесия.

Одно находится при $\phi = 0$ и является неустойчивым состоянием равновесия, а второе — при $\phi = \phi_0$ и является устойчивым состоянием равновесия. Хорошим аналогом состояния физического поля здесь является состояние шарика, положенного на желоб такой же формы, как и потенциал скалярного поля. Лежа точно на вершине желоба в точке $\phi = 0$, шарик может находиться в покое, но это состояние равновесия является неустойчивым. Достаточно слегка сдвинуть шарик или подтолкнуть его, как он начнет скатываться по желобу к правому или левому состоянию равновесия. Достигнув минимума, шарик покатается и остановится из-за трения с поверхностью желоба. Это довольно точная картина эволюции скалярного поля в космологии. К ней мы вернемся позже, а сейчас для нас только важно, что минимум потенциальной энергии скалярного поля находится при $\phi \neq 0$.

Физическое поле, описывающее, например, W^+ -бозон, взаимодействует с этим скалярным полем. Взаимодействие это нелинейное, причем величина скалярного поля играет роль массы поля W^+ -бозона. Если энергия поля велика (в нашей механической аналогии это соответствует случаю, когда шарик обладает очень большой скоростью и «скачет» по стенкам желоба, не опускаясь на дно), то среднее значение скалярного поля равно нулю. Это означает, что среднее значение массы W^+ при высоких энергиях взаимодействующих частиц равно нулю. Когда энергия шарика становится меньше высоты потенциала при $\phi = 0$, он «скачет» в правой или левой ямке потенциала. Средняя величина скалярного поля при этом не равна нулю, W^\pm - и Z -бозоны приобретают массу.

Этот механизм и был назван механизмом динамической генерации массы. При малых энергиях взаимодействующих частиц их массы обеспечиваются средней величиной скалярного поля, при повышении энергии массы исчезают. При этом масса частицы становится функцией энергии взаимодействующих частиц и начинает работать процедура перенормировки, позволяющая точно рассчитать основные характеристики взаимодействий частиц.

После этого многие физические константы, которые в классической физике рассматривались как мировые константы, стали

рассматриваться как некоторые величины, которые генерируются динамическим способом. В частности, константы связи, описывающие различные взаимодействия, стали рассматриваться как функции энергии.

Что такое константа связи? Эта величина, показывающая, с какой энергией взаимодействуют две частицы с заданными параметрами. Скажем, в ядре He^4 электрическая энергия отталкивания двух протонов составляет ~ 1 МэВ, в то время как ядерная энергия связи, рассчитанная на один нуклон (протон или нейтрон), составляет ~ 7 МэВ. Это, впрочем, не только характеристика двух констант связи (электромагнитной константы и константы связи сильного или хромодинамического взаимодействия), но также и характеристика нелинейных эффектов в ядерных взаимодействиях.

Констант связи известно четыре, по числу взаимодействий. Это электромагнитная константа связи или $\alpha_{em} = \frac{1}{137}$, константа слабого взаимодействия α_w , константа сильного взаимодействия α_s и константа гравитационного взаимодействия.

Константы связи тоже зависят от энергии частиц, которые участвуют во взаимодействиях. Зависят они, правда, по разному. Электромагнитная константа связи увеличивается (хотя и медленно), когда энергия взаимодействующих частиц растет. Две другие константы связи α_w и α_s уменьшаются. Все три константы сближаются и сравниваются, когда энергия взаимодействия становится равной примерно 10^{15} ГэВ.

Это означает, что все три взаимодействия становятся неразличимы. Так образуется единое взаимодействие, что означает объединение трех фундаментальных взаимодействий.

Конечно, это всего лишь пока теоретическая модель описания природы. Скорее всего та первая модель, которая была разработана физиками Джорджи и Глэшоу и теперь называется SU(5) (иногда также эта модель называется GUT), неверна. Теоретический анализ модели и попытки ее экспериментальной проверки в области низких энергий (имеются в виду попытки описать распад протона) показывают, что эта модель противоречит экспериментальным данным.

Как устроены взаимодействия при высоких энергиях (в области энергий 10^{15} ГэВ или выше), никто пока не знает. Однако, теоретическая модель столь убедительна, что большинство физиков используют идеи, заложенные в моделях GUT, для создания новых, более сложных моделей, которые, конечно, лучше описывают взаимодействия.

У всех них есть одно общее свойство. Это свойство динамической генерации массы частиц, это наличие скалярного поля с несколькими устойчивыми и также неустойчивыми состояниями равновесия.

Есть, однако, одно существенное отличие. Уже в первой модели высота потенциала в области неустойчивого состояния равновесия при $\phi = 0$ (см. рис. 6.1) была значительно выше, чем в потенциале Хиггса в стандартной электрослабой теории поля. Величина потенциала соответствовала энергии порядка $E \approx 10^{14}$ ГэВ. В современных моделях, как иногда говорят физики «всего на свете», значение потенциала, при котором наступает объединение всех фундаментальных взаимодействий, значительно отличается от этой величины, причем, как правило, в сторону больших значений энергий.

Форма потенциала скалярного поля в разных моделях также является разной. Потенциал может иметь несколько устойчивых минимумов, несколько неустойчивых состояний равновесия и т. п.

Однако, обсуждение разнообразных моделей взаимодействий в физике элементарных частиц заведет нас слишком далеко в сторону от главного предмета нашей книги. Остается только вновь добавить, что читатели, которые захотят подробнее познакомиться с современной теорией элементарных частиц, возьмут на себя труд найти и прочитать замечательную научно-популярную книгу [6].

Вспомним теперь о главном предмете изложения и перейдем к тем «метафизическим» проблемам космологии, которые решались в статье А. Гуса.

Метафизические проблемы космологии

Проблема горизонта

В прединфляционной космологии было несколько основных проблем, которые не решались фридмановской космологической моделью. Для этой модели они рассматривались как начальные условия. Вообще говоря, многие космологи просто не обращали на эти проблемы внимание.

Прежде всего к таким проблемам относилась проблема горизонта частиц.

Слово «горизонт» в физике возникло только после создания общей теории относительности. Вообще говоря, в нерелятивистской физике проблема горизонта возникнуть не могла, она теснейшим образом связана с конечностью скорости света, с конечностью скорости передачи взаимодействий.

В модели Фридмана подразумевается первичная однородность распределения вещества. Наблюдения показывают, что вещество действительно распределено однородно. Точнее, контраст плотности в больших масштабах, пока не затронутых гравитационной неустойчивостью, составляет не больше 10^{-5} . Эта очень маленькая величина, показывающая, что во Вселенной действовали какие-то физические механизмы, «выгладившие» контраст плотности. Почему был сделан такой вывод?

Наибольшая скорость распространения взаимодействий в природе равна скорости света. Это один из основных принципов теории относительности, тщательно проверенный экспериментально. Поэтому любые физические силы не передаются быстрее, чем скорость света. Если в каком-либо месте, по какой-либо

причине повысится температура, то информация о том, что повысилась температура, будет передаваться не быстрее чем со скоростью света. Это значит, что если в одном месте космической плазмы повысилась температура, выравниваться она будет с пространственной скоростью, не превышающей скорость света. Внесем во Вселенную, заполненную газом, свечу. Зажжем ее, от свечи начнут распространяться световой и тепловой фронты. Свет распространяется со скоростью 300 000 км/с. Световые лучи, распространяясь в космосе, первые несут с собой информацию о процессе — в данном случае о том, что зажгли свечу. Температурный фронт свечи будет распространяться со скоростью меньшей, чем скорость света; жители Проксимы Центавра, например, расстояние до которой от Земли составляет примерно четыре световых года, почувствуют повышение температуры позже, чем через 4 года после зажигания свечи. Если свеча будет гореть вечно и обладать достаточной мощностью, то температура вокруг начнет постепенно повышаться. Но повышение температуры не будет обгонять световой фронт; причинность во Вселенной устанавливается со скоростью не большей, чем скорость света.

Из предыдущих глав мы уже знаем, что Вселенная расширяется и что расширение началось в некоторый момент времени, который для удобства мы обозначаем $t = 0$. Как будет устанавливаться физическое взаимодействие в расширяющемся мире? Появляется начало. Любой процесс начинается позже, чем момент времени $t = 0$.

Горизонт частиц во Вселенной, показывающий, какое расстояние проходят лучи света за время t , прошедшее с момента «Большого Взрыва», меняется пропорционально времени, конкретно, для Вселенной, доминированной пылью (или для современной стадии эволюции Вселенной, которая наступила после $z \sim 10^4$):

$$L(t) = 3 \cdot t.$$

Расстояние между двумя пробными частицами меняется медленнее. Оно определяется произведением масштабного фактора $a(t)$ (который определяет зависимость от времени) на независимую от времени величину — расстояние в некоторый пробный

момент времени ξ :

$$x(t) = a(t) \cdot \xi.$$

Масштабный фактор в мире, доминированном пылью или излучением, меняется по степенному закону с показателем меньше, чем единица.

Для Вселенной, доминированной пылью, этот показатель составляет $\frac{2}{3}$:

$$a(t) \sim t^{2/3},$$

для Вселенной, доминированной излучением, этот показатель еще меньше, он равен $\frac{1}{2}$:

$$a(t) \sim t^{1/2}.$$

Взаимное изменение горизонта частиц и расстояния между двумя пробными частицами продемонстрированы на рис. 7.1.

На рис. 7.1 показаны эволюция горизонта частиц и расстояния между двумя пробными частицами. До некоторого момента времени t_c две точки являются причинно не связанными. Лучам света, которые вышли из первой точки, просто не хватило времени для того, чтобы достигнуть второй точки.

В момент t_c после «Большого Взрыва» первые лучи света, вышедшие из первой точки в момент «Большого Взрыва», достигают второй точки. После этого момента времени эти две точки являются уже причинно связанными. Теперь два наблюдателя, находящиеся в этих точках, узнают о существовании друг друга. Для $t > t_c$ между состояниями вещества в точках 1 и 2 может установиться равновесие. Например, будет выравниваться температура плазмы между этими точками, если первоначально температура плазмы в двух точках была различной.

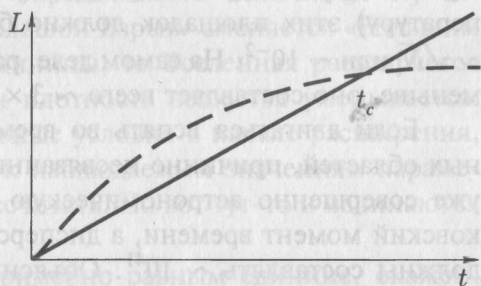


Рис. 7.1. Эволюция горизонта частиц (сплошная линия) и расстояния между двумя пробными частицами (пунктирная линия) для степенного закона расширения

Из рис. 7.1 также видно, что до момента t_c две частицы **никогда** не были в причинной связи, если только закон расширения имел такой же вид, как в случае Вселенной, доминированной пылью или излучением.

Более того, для всех уравнений состояния вещества, для которых давление является положительным, горизонт частиц **всегда** будет расширяться быстрее взаимного расстояния между двумя пробными частицами.

К моменту рекомбинации горизонт частиц составлял ~ 1 Мпк. Участок такого размера, лежащий на поверхности последнего рассеяния, сегодня имеет угловой размер $\sim 2^\circ$. Это значит, что на поверхности последнего рассеяния находятся примерно $N \sim 10\,000$ тысяч площадок, температура в которых к моменту рекомбинации не могла «выровняться». Согласно статистике Пуассона, разница температуры (поделенная на среднюю температуру) этих площадок должно быть, по порядку величины, $\sim \sqrt{N}$ или $\sim 10^{-2}$. На самом деле, различие температуры гораздо меньше, оно составляет всего $\sim 3 \times 10^{-5}$.

Если двигаться вспять во времени, то количество отдельных областей, причинно несвязанных друг с другом, составляет уже совершенно астрономическую величину $\sim 10^{83}$, на планковский момент времени, а дисперсия температур и плотностей должны составлять $\sim 10^{41}$. Объяснить, как из столь огромных величин появились ничтожно малые значения, разумным образом невозможно. Эта проблема называется проблемой горизонта фридмановской космологии.

Проблема плоскостности

Вторая проблема фридмановской модели Вселенной, которая решалась в статье А. Гуса, называлась проблемой плоскостности. Это довольно неуклюжее выражение таит в себе глубокий смысл.

Пространство вокруг нас практически плоское. Отличие геометрии нашего пространства от геометрии Евклида ничтожно. Оно обнаруживается только в девятом знаке после запятой,

Решение проблемы плоскостности объяснило, почему наш мир почти евклидов.

Возьмем параметр Ω примерно равным единице, скажем, 0,5 или 1,5. Посмотрим теперь, каким он должен быть в различные эпохи эволюции Вселенной, которые были до нашей эпохи. В эпоху рекомбинации отличие Ω от единицы уже не должно превышать 0,001. Большее отличие привело бы к тому, что сегодня Ω равнялось бы 10 или, скажем, 0,1, что легко измеримо. В эпоху нуклеосинтеза отличие Ω от единицы не должно превышать 0,000000000000000001. В более раннюю эпоху кварк-глюонной плазмы, отличие Ω от единицы «пряталось» в 21 знаке после запятой. В планковский момент это отличие выражалось величиной 10^{-60} . Откуда могут взяться такие начальные условия?

Почему расширяется Вселенная?

Было еще несколько «метафизических» проблем фридмановской космологии, которые решались теорией инфляции. Они не вошли в первую статью Гуса, хотя в ходе анализа последствий теории инфляционной Вселенной космологи смогли решить эти проблемы.

Одна из таких проблем формулируется крайне просто: почему наша Вселенная расширяется?

В предыдущих главах, описывая стандартную космологическую модель, мы всюду подчеркивали, что в космосе действуют силы притяжения (как было выяснено еще И. Ньютоном). Далекие галактики разлетаются по инерции. Какая сила родила первоначальный толчок? Что привело миры в движение?

Космология иногда называется теорией «Большого Взрыва». Может быть во взрывных механизмах надо искать причину первоначального толчка?

Действительно, рассмотрим взрыв какого-либо вещества, скажем тринитротолуола (тротила). Это вещество является смесью четырех химических веществ — углерода, азота, водорода и кислорода. В результате местного поджига возникает химическая реакция, которая быстро распространяется по всему объему взрывчатого вещества. В результате химических реакций вещество превращается в газ, давление внутри быстро нарастает, растет градиент (перепад) давления, возникают силы, вызванные давлением, которые разметаю частицы вещества в разные стороны, вызывая также разлет другого вещества, которое встретится на пути взрыва.

Энергия, приводящая к возникновению движения — это выделившаяся химическая энергия, которая превращается в кинетическую энергию разлетающегося вещества. Движущая сила — сила разности давлений внутри продуктов химических реакций и окружающего воздуха. Внутри продукты взрыва нагреты до высокой температуры.

В результате произошедшего взрыва вещество начинает разлетаться. В вакууме вещество разлетается неограниченно. Темпе-

ратура продуктов взрыва уменьшается, движение частиц вещества со временем хорошо описывается законом движения по инерции

$$\vec{r} = \vec{v}t,$$

очень похожим на хаббловский закон расширения Вселенной. Почти все признаки такой эволюции вещества присутствуют в космологии.

Конечно, химический взрыв слишком слаб, для того чтобы привести в движение 10^{22} солнечных масс, которые составляют видимую часть Вселенной, но можно представить себе ядерный, термоядерный взрыв, в конце концов взрыв неизвестного типа с гигантским выделением энергии. Может ли такой взрыв объяснить начальный толчок?

Ответ на этот вопрос прост — нет.

Движущая сила взрыва (неважно, химического или термоядерного) — разница давлений. При взрыве возникает неоднородное распределение вещества. Существует и остается центр взрыва. Ничего подобного во Вселенной не наблюдается. Вещество распределено однородно, точка, которую можно было бы отождествить с центром, отсутствует.

Первопричина разлета — проблема, которую поставила, но не могла решить космологическая теория, созданная Александром Александровичем Фридманом.

Как образуется расширение по закону Хаббла?

Расширение по закону Хаббла тоже можно причислить к метафизическим проблемам космологии. В рамках стандартной фридмановской модели закон расширения Хаббла не удавалось получить «динамическим» механизмом, подобно тому, как из малых возмущений плотности образовались галактики, которые мы наблюдаем.

В предыдущем параграфе мы пояснили, что форма закона Хаббла присуща многим физическим процессам, в частности, обычным химическим взрывам. Однако, при расширении вещества в результате обычного взрыва всегда есть центр взрыва, всегда существуют градиенты давления. Координата r , которая

фигурирует в законе, отсчитывается от центра взрыва. Две произвольные точки меняют расстояние между собой по другому закону, непохожему на $\vec{r} = \vec{v}t$.

Основная проблема, которую не могла решить стандартная космологическая теория, — получить расширение в виде закона Хаббла для однородно распределенного вещества в результате действия известных физических процессов.

Инфляционная Вселенная

Рассмотрим состояние скалярного поля в ранней Вселенной, когда начинается стадия инфляции. Конденсат скалярного поля по всем основным характеристикам подобен вакууму виртуальных частиц. Поэтому он называется состоянием вакуума скалярного поля. Это поле нелинейно, оно взаимодействует само с собой, и потенциальная энергия взаимодействия в зависимости от величины поля представляет собой сложную функцию. На рис. 8.1 показана зависимость энергии скалярного поля $V(\phi)$ от величины поля. У поля, показанного на рисунке, существует три вакуумных состояния. Одно состояние обычно называется состоянием фальшивого вакуума, и оно соответствует значению потенциала скалярного поля $\phi = 0$, два других состояния называются состояниями истинного вакуума, они находятся при значении отличного от нуля скалярного поля $\phi = \pm\phi_0$.

На рис. 8.1 изображена потенциальная функция скалярного поля, обладающего двумя несвязанными состояниями истинного вакуума. Можно немного модифицировать зависимость $V(\phi)$. Будем считать, что скалярное поле представляет из себя дублет двух скалярных полей ϕ_1 и ϕ_2 . Причем «разрез» потенциальной функции, проведенный через центр графика, который совпадает со значениями аргументов $\phi_1 = 0$ и $\phi_2 = 0$, похож на график функции $V(\phi)$ для одного скалярного поля. Другими словами, график новой функции $V(\phi_1, \phi_2)$ получается «вращением» профиля $V(\phi)$ вокруг оси V , а одно скалярное поле при вращении «превращается» в два поля.

Тогда график $V(\phi_1, \phi_2)$ становится трехмерным (рис. 8.2), заданным на плоскости с аргументами ϕ_1 и ϕ_2 .

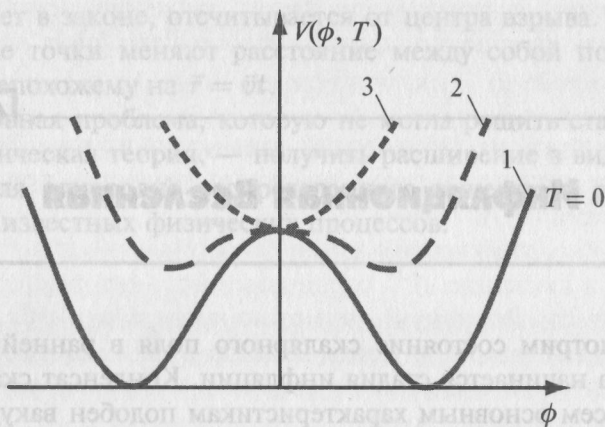


Рис. 8.1. График потенциальной энергии скалярного поля в зависимости от величины самого поля. По вертикальной оси отложена величина потенциальной энергии, по горизонтальной оси — величина поля. Сплошной линией (1) показана зависимость потенциальной энергии в отсутствие вещества других типов. Значение энергии поля при $\phi = 0$ обозначим V_0 и в дальнейшем будем называть это значение энергией ложного или фальшивого вакуума. Это значение соответствует невозмущенной энергии конденсата скалярного поля. У функции, изображающей энергию, есть два положения равновесия. Одно находится при $\phi = 0$, оно является неустойчивым положением равновесия. Второе находится при $\phi = \pm\phi_0$. Два этих положения равновесия являются устойчивыми и соответствуют истинному состоянию вакуума и второму состоянию конденсата скалярного поля. Штрихованной линией (2) показана потенциальная энергия скалярного поля в присутствии вещества, сформированного частицами векторных и спинорных полей, которое представляет из себя горячую плазму с температурой T . Пунктирной линией (3) изображена потенциальная энергия поля ϕ для плазмы с температурой $T_1 > V_0^{1/4}$.

По вертикальной оси (аналогом в декартовой системе координат является ось Oz) отложена величина потенциальной энергии, по двум горизонтальным (аналогом которых являются оси Ox и Oy) — значения полей ϕ_1 и ϕ_2 . Поверхность показывает зависимость потенциальной энергии V от скалярных полей ϕ_1 и ϕ_2 в отсутствие вещества других типов. Значение энергии поля при $\phi = 0$ вновь обозначим V_0 и в дальнейшем будем называть это значение энергией ложного или фальшивого вакуума. Теперь у функции, изображающей энергию, есть одно положение равновесия, которое находится при $\phi = 0$, оно

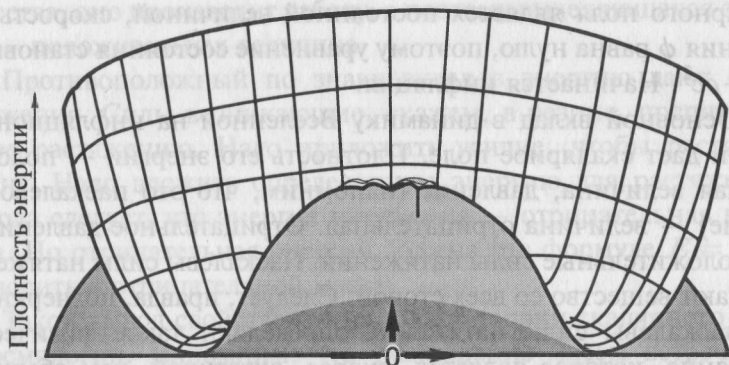


Рис. 8.2. График потенциальной энергии скалярного поля для дублета скалярных полей

является неустойчивым положением равновесия. Остальные положения равновесия находятся при $\phi_1^2 + \phi_2^2 = \phi_0^2$. Множество этих значений образует окружность вокруг оси V с радиусом ϕ_0 . Если сделать преобразование в цилиндрическую систему координат на плоскости ϕ_1 и ϕ_2 , то каждое состояние дублета скалярного поля будет характеризоваться «радиусом» $\sqrt{\phi_1^2 + \phi_2^2}$ и «фазой» $\psi = \arctg(\frac{\phi_2}{\phi_1})$. Множество вакуумов различается фазой ψ . Множество этих положений равновесия является устойчивым и соответствует истинному состоянию вакуума.

Хорошей аналогией состояния и эволюции скалярного поля является эволюция шарика, положенного на желоб такого же профиля, как и потенциал самого поля. Мы будем часто использовать эту аналогию, чтобы пояснить состояние и эволюцию скалярного поля на стадии инфляции и после нее.

До начала стадии инфляции форма потенциала скалярного поля определяется пунктирной линией, эта форма такая же, как у других полей, обладающих массой. Поле испытывает быстрые колебания вокруг значения $\phi = 0$, уравнение состояния совпадает с уравнением состояния радиационно-доминированной плазмы. Вселенная расширяется по степенному закону. После остывания до температуры $T \sim V_0^{1/4}$ состояние скалярного поля «садится» в ямку, соответствующую $\phi = 0$. При этом значение

скалярного поля является постоянной величиной, скорость изменения ϕ равна нулю, поэтому уравнение состояния становится $p = -\rho c^2$. Начинается инфляция.

Основной вклад в динамику Вселенной на инфляционной стадии дает скалярное поле. Плотность его энергии — положительная величина, давление (напомним, что это паскалево давление) — величина отрицательная. Отрицательное давление — это положительные силы натяжения. Паскалевы силы натяжения сжимают вещество со всех сторон. Следует, правда, подчеркнуть, что паскалевы силы натяжения определяют такое физическое состояние, которое является, скорее, экзотикой, чем обычным состоянием вещества в лабораторных условиях нашего мира. Давление такого вида развивается при явлениях кавитации — появления пузырьков вслед, скажем, за гребущим веслом. Естественно, что при кавитационных явлениях отрицательное давление в пузырьках слабое, оно значительно меньше, чем плотность энергии покоя окружающей воды.

В очень ранней Вселенной на инфляционной стадии отрицательное давление было предельно сильным. Отношение давления к плотности энергии было равно минус единице. Такое состояние называется доминированием скалярного поля. Отрицательное давление не производило механического действия, подобного тому, которое кавитационные пузырьки производят на весло. Такое действие производится перепадами давления (скажем, между пузырьком и водой). Напомним, что вещество было распределено однородно, фазы вещества с различным давлением отсутствовали, давление во всем веществе было отрицательным. Другое дело — гравитационное воздействие отрицательного давления. Такое воздействие существует и меняет динамику эволюции Вселенной.

В ньютоновской теории гравитации масса тела пропорциональна плотности вещества. В общей теории относительности вклад в притягивающую массу вносит также и давление. Давление производит работу, работа — это высвободившаяся энергия, энергия равняется массе, умноженной на квадрат скорости света. Значит, давление обладает массой. Положительное давление, скажем, в газе, способствует «расталкиванию» окружающего

вещества, оно производит работу, а поэтому выделяющаяся энергия — положительная величина.

Противоположный по знаку вклад в энергию дают силы натяжения. Силы возникающие, скажем, в резине, препятствуют ее растяжению. Надо приложить усилие, чтобы растянуть резину. Надо вложить определенную энергию для растяжения. Отсюда следует, что энергия натяжения — отрицательная величина. Но отрицательная энергия должна (по формуле $E = mc^2$) приводить к отрицательной массе.

Такой вывод свойственен не только теории скалярного поля в космологии. Напомним, что уменьшение массы встречается (и довольно часто) уже в современной лабораторной физике. Масса дейтерия, который составлен из протона и нейтрона, меньше, чем сумма масс протона и нейтрона по отдельности. Эта разность масс, соответствующая энергии $\Delta E \approx 2,2$ МэВ, называется ядерным дефектом массы. Силы, которые сдерживают протон и нейтрон вместе в ядре дейтерия — силы натяжения — вносят отрицательный вклад в инертную массу. Значит, они вносят отрицательный вклад в гравитационную массу (согласно принципу эквивалентности).

Гравитационная масса, которая пропорциональна сумме плотности и утроенного давления, становится отрицательной в период инфляции! Гравитационное притяжение заменяется отталкиванием.

Во Вселенной развиваются силы ускорения, в отличие от сил притяжения при доминировании обычного вещества. Такая динамика приводит к тому, что параметр Хаббла является постоянным во время инфляции. Если быть абсолютно точным, то он немного изменяется, однако характерное время его изменения, умноженное на значение величины этого параметра, гораздо больше единицы. Интервал времени, равный обратному значению постоянной Хаббла, обозначим τ . Масштабный фактор растет со временем экспоненциально. Интервал времени, за который масштабный фактор увеличивается в 2,718281828 раз, есть τ . При этом по закону экспоненты меняется также и объем Вселенной. Скорость между двумя пробными частицами равна производной от масштабного фактора по времени. Но экспонента — это

единственная функция у которой производная с точностью до численного множителя совпадает с самой функцией! Численным множителем здесь является постоянная Хаббла (в тот период). Скорость частиц (которая является производной от расстояния) увеличивается пропорционально самому расстоянию между частицами — так в ранней Вселенной формируется закон Хаббла. После того, как этот закон движения формируется во время инфляции, он передается от эпохи к эпохе практически без искажения. Закон расширения Хаббла — наследие самой ранней эпохи в эволюции нашего мира.

В экономике период, когда рост денежной массы пропорционален самой массе, называется инфляцией. По аналогии Гус назвал свою теорию инфляционной.

Рост масштабного фактора по закону экспоненты имеет еще несколько важных следствий.

Решение проблемы горизонта

Рассмотрим домен с размером, равным горизонту частиц к началу инфляции. Горизонт частиц во время инфляционной стадии является постоянной величиной. Он равен обратному значению параметра Хаббла $l_H = cH_{\text{inf}}^{-1}$; по современным оценкам, он составляет примерно $l_H \sim 10^{-30}$ см. Внутри этого размера к началу инфляции установилось термодинамическое равновесие и причинная связь. Во время инфляционной стадии (длительностью Δt) домен размером 10^{-30} см «раздувается» экспоненциально и за 60 характерных времен $H\Delta t \approx 60$ становится порядка 1 см. Внутри объема размером 1 см³ Вселенная является «гладкой». Нет больших контрастов плотности, температуры и давления. Отсутствуют также большие перепады гравитационного потенциала. Во время дальнейшей эволюции этот домен будет растянут общим космологическим расширением в 10^{29} раз и сегодня занимает область больше современного горизонта частиц нашей Вселенной. Так решается проблема горизонта.

Длительность инфляционной стадии является нерешенной проблемой. Так, Алан Гус со своими соавторами полагает, что она

длится «всего» лишь 100 характерных времен $H \Delta t \approx 100$. Андрей Линде развил модель нашей Вселенной, в которой расширение составляет поистине астрономическую цифру $H \Delta t \sim 10^{1000}$. Та-кую цифру представить себе невозможно! В этой модели инфля-ционной стадии Вселенная раздувается так, что прединфляцион-ный горизонт размером всего 10^{-30} см занимает домен размером 10^{970} см. Естественно, что вся наблюдаемая часть Вселенной (со-временный горизонт частиц) является ничтожно малой частью этой «большой» Вселенной.

Для решения проблемы горизонта (или причинной связно-сти внутри современного горизонта частиц) необходимо, чтобы Вселенная на инфляционной стадии «жила» интервал времени не короче, чем $\Delta t \approx 60 H_{\text{inf}}^{-1}$. За это время масштабный фактор успеет вырасти в 10^{30} раз и к концу инфляционной стадии при-чинно связанный домен достигнет ~ 1 см. После конца этой стадии вся энергия ложного вакуума переходит в другую форму. Рождаются элементарные частицы, точнее, образуется плазма элементарных частиц, нагретая до температуры $T \sim 10^{29}$ К. Все-ленная начинает расширяться по степенному закону (масштаб-ный фактор растет как некоторая степень времени). Красное смещение момента окончания инфляции $z \sim 10^{29}$. Две частицы, разделенные размером 1 см сразу после окончания инфляции, в современный момент разделены расстоянием 10^{29} см. Они, од-нако, уже установили причинный контакт еще до начала инфля-ции. Контраст плотности, давления и температуры еще до начала инфляции внутри этого домена был мал. Теперь, когда домен был увеличен общим расширением Вселенной в 10^{60} раз, в нем оста-лось то состояние, которое сформировалось во время инфляции.

Решение проблемы плоскостности

Проблема плоскостности решается также просто, как и про-блема горизонта. Вспомним, что критерием близости нашего пространства к плоскому в космологии является величина, ко-торая есть отношение плотности нашего мира к критической плотности, она обозначается греческой буквой Ω . Если Ω равна

единице, то наш мир в точности плоский. Критическая плотность пропорциональна квадрату параметра Хаббла и является удельной кинетической энергией пробного объема вещества¹⁾. Плотность вещества является удельной потенциальной энергией пробного объема вещества. Поэтому Ω является отношением удельной потенциальной энергии к удельной кинетической энергии пробного объема вещества.

Плотность вещества в эпоху доминирования скалярного поля быстро стремится к постоянной величине, равной половине квадрата параметра Хаббла. Квадрат производной от масштабного фактора тоже стремиться к той же величине. Их отношение стремится к единице. Действительно, пусть до эпохи инфляции кривизна Вселенной была ненулевой. Это означает, что параметр Ω был отличен от единицы, скажем $\Omega > 1$, что соответствует топологии замкнутого пространства, когда Вселенная эквивалентна поверхности шара.

$\Omega = 1$ соответствует плоской геометрии, мы же рассматриваем геометрию шара. При раздувании шара его радиус растет, во время инфляционной стадии Вселенной ее радиус кривизны тоже растет. Если выделить маленькую область на поверхности шара, то кривизна этой области тоже будет мала. Вспомним, что в некоторых моделях вся наблюдаемая часть Вселенной является малой частью 10^{-970} от домена, в котором на прединфляционной стадии установилось термодинамическое равновесие. Если мы будем рассматривать размер, равный 10^{-970} части радиуса шара, то кривизна этого кусочка поверхности будет незаметна. Поэтому и параметр Ω в таких моделях инфляционной Вселенной будет неотличим от единицы.

Так решается проблема плоскостности.

Почему расширяется Вселенная

Движущая сила расширения Вселенной — сила гравитационного отталкивания, возникающая на стадии инфляции. Эта сила была вызвана конденсатом скалярного поля на инфляционной

¹⁾ См. главу 4.

стадии. Этот конденсат скалярного поля эквивалентен Λ -члену в уравнениях Эйнштейна.

Λ -член (или космологическая постоянная) был введен в уравнения гравитационного поля самим А. Эйнштейном. Он модифицировал свои уравнения общей теории относительности для того, чтобы получить статическое решение, описывающее Вселенную. Хотя позже выяснилось, что наша Вселенная расширяется, и надобность в создании статической модели Вселенной отпала, идея не была забыта.

Де Ситтер несколько позже нашел уравнение, описывающее расширяющуюся Вселенную с Λ -членом; теперь эта космологическая модель называется моделью (или Вселенной) де Ситтера.

Интерес к модели де Ситтера время от времени вновь возникал в сообществе космологов, так как основное свойство Λ -члена — способность вызывать ускорение, а не замедление Вселенной — интриговало астрономов, и любое подозрение на существование стационарного участка в истории расширения или подозрение о наличии следов ускорения вызывало к жизни старые идеи Эйнштейна—де Ситтера.

Уже в конце двадцатого века, замечательные советские ученые Д. Киржниц и А. Линде показали, что в ранней Вселенной могла эффективно генерироваться космологическая постоянная, эквивалентная силам отталкивания. А. Старобинский при анализе квантовых поправок к уравнениям Эйнштейна также обнаружил решение, которое было эквивалентно решению де Ситтера, и разработал теорию самосогласованного решения, в котором квантовые поправки к уравнениям гравитационного поля служили источником, порождающим ненулевую кривизну пространства — времени.

В 1981 г. Алан Гус на основе работ Киржница и Линде разработал теорию инфляционной Вселенной, ввел эффективную космологическую постоянную, вызванную конденсатом скалярного поля. Приливные силы, генерируемые ей, были чудовищны, они составляли величину 10^{74} с^{-2} .

Такие приливные силы расталкивания значительно превосходят силы, которые возникают при химическом или ядерном взрыве. Эти силы обеспечивают «разгон» вещества Вселенной

в течение эпохи инфляции. Самое главное в том, что эти силы возникают в однородной Вселенной, они не зависят от градиента давления или температуры; наоборот, они выравнивают всякие градиенты, способствуя образованию однородного распределения в веществе. После окончания инфляционной эпохи Вселенная продолжает расширяться (вплоть до нашего времени) по инерции.

Вот почему расширяется наша Вселенная.

Как образуется расширение по закону Хаббла

Закон Хаббла выглядит очень просто:

$$\vec{v} = H\vec{r}.$$

Итак, скорость двух пробных частиц пропорциональна расстоянию между ними. Чем дальше частицы друг от друга, тем больше скорость их удаления друг от друга. Такое движение образуется тоже во время инфляционной стадии.

В механике движение пробной частицы описывается уравнением, которое определяется действующей силой, начальным положением частицы и ее начальной скоростью.

Рассмотрим две пробные частицы в расширяющейся Вселенной. Физическое расстояние между частицами определяется произведением масштабного фактора $a(t)$ на расстояние в координатах Лагранжа (см. главу 4):

$$x(t) = a(t) (\xi + \mu t).$$

Физическая скорость этих частиц определяется производной от масштабного фактора, разделенной на сам масштабный фактор (т. е. параметром Хаббла) плюс еще одно добавочное слагаемое:

$$\frac{v(t)}{x(t)} = H + \frac{\mu}{\xi + \mu t}. \quad (8.1)$$

Сила, действующая на две пробные частицы, «спрятана» в параметре Хаббла, который во время инфляции является постоянным. Начальная разность положения частиц ξ и начальные

скорости частиц μ (которые, разумеется, являются произвольными) оказывают на формирование закона расширения все меньшее влияние по мере течения времени.

Естественно, что в любую другую эпоху, когда масштабный фактор увеличивается по степенному закону, параметр Хаббла уменьшается пропорционально времени, и второе слагаемое тоже вносило бы значимый вклад в формирование закона расширения. Поэтому для формирования закона расширения Хаббла абсолютно необходимо существование в прошлом стадии, когда масштабный фактор менялся по закону экспоненты, а параметр Хаббла был постоянной величиной.

В эпоху инфляции первое слагаемое в уравнении (8.1) (параметр Хаббла) является постоянной величиной, а второе слагаемое быстро убывает со временем. К моменту окончания инфляции формируется расширение, практически неотличимое от закона расширения Хаббла. В дальнейшем этот закон расширения передается от одной эпохе к другой без искажений.

Так во время инфляции получается хаббловское расширение галактик.

Окончание инфляционной стадии

Этот параграф является «необязательным». Сейчас космологи могут лишь сказать, что инфляционная стадия была на ранних этапах эволюции Вселенной. Точная модель инфляции неизвестна. Поэтому существует огромный простор в построении различных моделей инфляционной стадии Вселенной; необходимо только, чтобы рассматриваемая модель удовлетворяла нескольким основным критериям: обеспечивала достаточное время расширения и порождала такой спектр возмущений плотности, который наблюдается по результатам экспериментов.

Факту, что сама инфляционная стадия существовала в далеком прошлом, есть косвенные подтверждения, перечисленные в этой главе, а также прямое доказательство, которое мы рассмотрим чуть позже, когда будем обсуждать анизотропию реликтового излучения. В первой инфляционной модели, которую развивал

сам А. Гус, инфляция оканчивалась после примерно $H \Delta t \sim 100$. Сейчас существуют модели вечной инфляции, которая никогда не кончается (их мы обсудим ниже, в главах 10 и 18).

Теперь же мы обсудим инфляционную теорию, в которой существует момент окончания инфляции во всем пространстве. В такой модели интервал времени, в течение которого доминировала энергия фальшивого вакуума, является непродолжительным. Правда, он длится не менее 100 характерных времен. Это физическое состояние начинает разрушаться из-за внутренней неустойчивости.

Объяснение явления неустойчивости начнем с того факта, что скорость звука в веществе определяется частной производной от давления по плотности. В веществе, которое обладает отрицательным давлением, скорость звука является мнимой величиной. Это значит, что плоская звуковая волна в таком веществе описывается не функцией $e^{\pm i k(v_{\text{sound}} t - \vec{r})}$, а функцией вида $e^{\pm \gamma t} \cdot e^{\pm i k \vec{r}}$. Слагаемое в функции, которая описывает звуковую волну, пропорциональное $e^{-\gamma t}$, затухает со временем, но слагаемое вида $e^{+\gamma t}$ быстро возрастает. Увеличивается контраст плотности, вещество начинает «входить» в стадию нелинейной эволюции, начинается разрушение состояния.

Рассмотрим вновь рис. 8.2. Инфляция происходит, пока значение скалярного поля равно нулю. После окончания инфляционной стадии скалярное поле начинает скатываться в положение истинного вакуума, который находится при ненулевом значении ϕ .

Представим себе эволюцию поля на примере шарика, который катится по желобу такого же профиля, как на рис. 8.3.

Шарик представляет собой состояние скалярного поля. Пока шарик находится в верхней ямке, Вселенная расширяется по экспоненциальному закону, идет эпоха инфляции. Если шарик движется там не очень быстро, то он не может достигнуть вершины и оказаться на склоне. Если же он движется слишком быстро, то при первом колебании он «перевалит» через вершину и начнет скатываться по склону. В этом случае эпоха инфляции будет слишком короткой. Поэтому считают, что в верхней ямке шарик движется медленно.

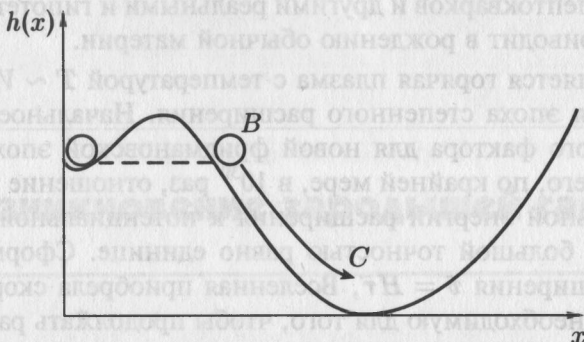


Рис. 8.3. Здесь нарисован желоб того же профиля, как и потенциал Хиггса. На рисунке изображен процесс туннелирования. В квантовой механике возможен путь «подбарьерного» перехода, как показано здесь. Шарик может из ямки попасть на склон барьера. После этого начинается классическая эволюция скалярного поля. Шарик, катящийся по желобу, представляет состояние скалярного поля. В правой ямке, «минимуме потенциала скалярного поля, соответствующего $\phi > 0$ », присутствует вещество, тормозящее шарик. Когда шарик достигает дна, инфляция прекращается, во Вселенной начинается режим степенного расширения

В классической механике шарик не может проникнуть сквозь склон. В квантовой теории состояние скалярного поля может «протуннелировать» сквозь потенциальный барьер. Этот эффект в квантовой механике известен давно, наш соотечественник Г. Гамов объяснил с его помощью α -излучение радиоактивных атомов.

На рис. 8.3 пунктирной линией показан путь «подбарьерного перехода» состояния скалярного поля. После того, как состояние окажется в месте, помеченном буквой *B*, начинается обычная классическая эволюция поля. Шарик скатывается в новое состояние минимума, колеблется вокруг нового положения равновесия, затем успокаивается. Потенциальная энергия скалярного поля становится нулевой. Этот момент соответствует окончанию инфляции.

В момент достижения основной ямки *C* шарик приобретает максимальную скорость. Так же и скалярное поле при достижении минимума обладает максимальной производной по времени. Взаимодействие скалярного поля с полями электронов, кварков,

глюонов, лептокварков и другими реальными и гипотетическими полями приводит в рождению обычной материи.

Появляется горячая плазма с температурой $T \sim V_0^{1/4}$, вновь начинается эпоха степенного расширения. Начальное значение масштабного фактора для новой фридмановской эпохи больше предыдущего, по крайней мере, в 10^{30} раз, отношение кинетической удельной энергии расширения к потенциальной удельной энергии с большой точностью равно единице. Сформировался закон расширения $\vec{v} = H\vec{r}$, Вселенная приобрела скорость расширения, необходимую для того, чтобы продолжать расширение достаточно долго, по крайней мере, вплоть до современного момента времени.

Возникновение зародышей галактик

Наша Вселенная однородна лишь в среднем, в очень больших масштабах $L > 200$ Мпк. По мере уменьшения масштабов мы видим ярко выраженную структуру в виде сверхскоплений и скоплений галактик $L > 100$ – 10 Мпк, самих галактик $L \approx 100$ – 10 кпк, шаровых звездных скоплений $L \approx 1$ пк, и, наконец, звезд и планет. Эта структура возникла в результате обусловленного гравитационной неустойчивостью роста первоначально малых возмущений плотности. Они обязаны своим происхождением физическим процессам на инфляционной стадии развития Вселенной. В 1980-х годах было выяснено, что их величина и характерные масштабы определяются фундаментальными параметрами физики микромира.

Сравнительно недавно было неясно, какие физические процессы могли привести к флуктуациям, существенным на космологических масштабах. Важную роль здесь сыграла теория инфляционной Вселенной. Вакуумные квантовые флуктуации, которые обычно проявляются только в микроскопических масштабах, в экспоненциально расширяющейся Вселенной быстро увеличивают свою длину $\lambda \rightarrow \lambda e^{Ht}$ и амплитуду и становятся космологически значимыми. Поэтому можно сказать, что скопления галактик и сами галактики являются макроскопическими проявлениями квантовых флуктуаций.

Возмущения плотности

В конце стадии инфляции в ранней Вселенной скалярное поле, управляющее инфляцией, «скатывается» из неравновесного

состояния в равновесное. Во время этого нестационарного процесса происходит генерация возмущений плотности из вакуумных колебаний скалярного поля.

Виртуальные кванты

Несмотря на то, что скалярное поле во время инфляционной стадии образует конденсат, оно не является абсолютно однородным полем. Существует небольшая зависимость от пространственных координат и времени. Происходит так потому, что квантовые поля обладают флуктуациями. Точнее сказать, все термодинамические величины обладают флуктуациями. Однако в классической физике считалось, что при достижении абсолютного нуля температуры флуктуации основных физических величин (например, энергии) исчезают. В квантовой теории это не так. Даже при абсолютном нуле температуры существуют **нулевые** колебания поля. Состояние, соответствующее нулевой температуре в случае, например, фотонного поля, есть состояние вакуума фотонного поля. Такие фотоны называются виртуальными.

Поэтому даже в вакууме, когда реальное электромагнитное поле отсутствует, присутствуют виртуальные фотоны или нулевые флуктуации электромагнитного поля. Энергия реального фотона однозначно определяется его частотой $E = \hbar\omega$. Энергия виртуального фотона тоже определяется частотой, но зависимость энергии от частоты другая: $E = \frac{\hbar\omega}{2}$. Если для возбуждения реальных фотонов нужен переменный ток, например, который течет в антенне башни Шухова на Шаболовке, то виртуальные фотоны существуют вокруг нас всегда.

Реальные электроны взаимодействуют с виртуальными фотонами, надо только упомянуть, что взаимодействие это слабое. Тем не менее они производят вполне измеримые эффекты. Один из таких эффектов — лэмбовское смещение $2P_{1/2} - 2S_{1/2}$ уровней водородного атома. Образно говоря, виртуальные фотоны «индуцируют» спонтанное излучение электрона при переходе из состояния $2P_{1/2}$ в состояние $2S_{1/2}$. Кроме того, нулевые флуктуации вызывают спонтанное излучение в лазерах, параметрических усилителях и тому подобных современных электронных приборах.

Усиление нулевых колебаний

После окончания инфляционной стадии скалярное поле начинает скатываться в положение истинного вакуума. Представим себе шарик, который катится по желобу такого же профиля, как на рис. 9.1.

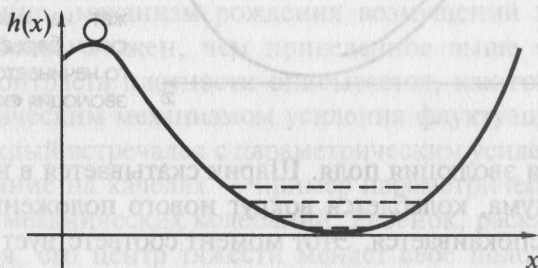


Рис. 9.1. Здесь нарисован желоб того же профиля, как и потенциал Хиггса. Шарик, катящийся по желобу, представляет состояние скалярного поля. В правой ямке, «минимуме потенциала скалярного поля», соответствующей $\phi > 0$, присутствует вещество, тормозящее шарик. Когда шарик достигает дна, он тормозится этим веществом. Также и скалярное поле достигает истинного минимума, поле колеблется и из-за взаимодействия с полями других типов колебания затухают. Инфляция прекращается, появляется горячая плазма, во Вселенной начинается режим степенного расширения

Шарик представляет собой состояние скалярного поля. Пока шарик находится в верхней ямке, Вселенная расширяется по экспоненциальному закону, идет эпоха инфляции. Если шарик движется там не очень быстро, то он не может достигнуть вершины и оказаться на склоне. Если же он движется слишком быстро, то при первом колебании он «перевалит» через вершину и начнет скатываться по склону. В этом случае эпоха инфляции будет слишком короткой. Поэтому считают, что в верхней ямке шарик движется медленно.

В классической механике шарик не может проникнуть сквозь склон. В квантовой теории состояние скалярного поля может «протуннелировать» сквозь потенциальный барьер.

На рис. 9.2 сплошной стрелкой показан путь «подбарьерного перехода» состояния скалярного поля. После того, как состояние окажется в месте, помеченном буквой B , начинается обычная

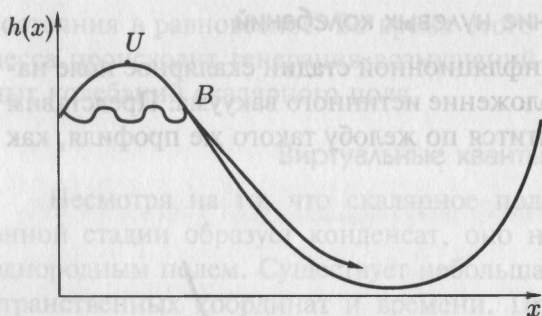


Рис. 9.2. На рисунке изображен процесс туннелирования. В квантовой механике возможен путь «подбарьерного перехода», как показано здесь. Шарик может из ямки попасть на склон барьера. После этого начинается классическая эволюция скалярного поля

классическая эволюция поля. Шарик скатывается в новое состояние минимума, колеблется вокруг нового положения равновесия, затем успокаивается. Этот момент соответствует окончанию инфляции.

Теперь представим себе, что процесс попадания на склон, а, соответственно, и скатывания начинается в разное время. Пусть разница во времени будет небольшая, обозначим ее Δt . Значительно важнее факт, что в одних местах пространства инфляция уже закончилась, а в соседних еще продолжается.

Рассмотрим две области Вселенной. В первой области пространства, в которой инфляция уже закончилась, родилась обычная материя с плотностью, равной примерно квадрату параметра Хаббла H во время инфляции (конечно, выраженного в планковских единицах), и эта область начинает расширяться по степенному закону. Во второй области еще некоторое время Δt продолжается инфляция; когда она там прекращается, рождается материя с плотностью, равной также квадрату параметра Хаббла H во время инфляции. К этому моменту времени плотность первой области уже успела уменьшиться в результате степенного расширения. Значит, в этих двух областях возникает контраст плотности, равный по порядку величины $\Delta t H$.

В различных местах пространства поле имеет различную величину. Различная величина обеспечивается нулевыми флуктуациями скалярного поля. Различная величина поля аналогична различному положению шарика в ямке на рис. 9.2. Поскольку вероятность туннелирования, а, следовательно, и время

нахождения шарика в ямке зависит от высоты барьера, то шарик, лежащий в разных местах ямки, «протуннелирует» на склон барьера за разное время — вот механизм неоднородного окончания инфляции. Этот механизм ведет к возникновению контраста плотности в ранней Вселенной, к образованию флуктуаций плотности.

Конечно, механизм рождения возмущений плотности несколько более сложен, чем приведенное выше описание. Рождение контраста плотности описывается, как говорят физики, параметрическим механизмом усиления флуктуаций скалярного поля. Каждый встречался с параметрическим усилением в жизни. Раскачивание на качелях — пример параметрического усиления обычных механических колебаний. Ребенок, раскачивая качели, изгибается, его центр тяжести меняет свое положение относительно подвеса и вызывает изменение параметра — эффективной длины подвеса. Раскачивая «как надо», или, как физики говорят, с нужными частотно-фазовыми характеристиками, можно достигнуть очень большой амплитуды колебаний, т. е. хорошо раскачать качели. Видимо, подобный механизм действовал во время инфляционной стадии. Для параметрического усиления, правда, необходимы «затравочные» колебания. В нашем случае такие затравочные колебания — нулевые флуктуации скалярного поля.

Остается только добавить, что первые вычисления, на основе которых можно объяснить возникновение «зародышей» галактик, проделал наш соотечественник, знаменитый космолог А. А. Старобинский, а формальную теорию параметрического усиления нулевых вакуумных колебаний скалярного поля в ранней Вселенной построили В. Н. Лукаш и В. Ф. Муханов.

Спектр Зельдовича—Харрисона

Флуктуации плотности можно также представить себе как совокупность звуковых волн. Звуковые волны характеризуются амплитудой (которая обеспечивает громкость звука), частотой (высота звука) и фазой (момент времени, когда звук начинается). Обычные звуковые волны характеризуются спектром. Спектр — это слово пришло к нам из латыни, оно означает «невидимый».

Давно в физике утеряно первоначальное значение этого слова, теперь оно обозначает зависимость амплитуды волны от ее частоты. Такая функциональная зависимость называется спектром.

Спектры звуков бывают самые различные. Разные звуковые спектры приводят к разному восприятию звуков. Чарующие звуки музыки квартета «Битлз» или рев реактивного двигателя на аэродроме — оба этих набора звуков характеризуются спектром, но какое различное восприятие! Надо только добавить, что все спектры, с которыми мы имеем дело на Земле или в лаборатории, обладают конечной шириной. Это связано с тем, что все звуки на Земле производятся земными устройствами, которые имеют конечные размеры.

Иное дело «звук», производимый самой Вселенной, точнее, «крик» новорожденной Вселенной. Звук слабый, он имеет свойства стохастического сигнала, похожего на шумы моря или шепот далекого ветра. Однако, спектр этот тянется от очень высоких частот ~ 100 МГц до сверхнизких частот $\sim 10^{-17}$ Гц, равных современному значению постоянной Хаббла. Это самый широкий спектр, который есть в природе.

Если посчитать, сколько энергии звуковых волн содержится в спектре от частоты ν до частоты, скажем, 2ν , то окажется, что количество энергии не зависит от самой частоты. Другими словами, количество энергии в полосе частот от 10^{-17} Гц до 2×10^{-17} Гц такое же, как в полосе частот от 10 МГц до 20 МГц. Энергия звуковой волны пропорциональна частоте волны. Поэтому одинаковое количество энергии на разных частотах возможно в том случае, если амплитуда волны обратно пропорциональна частоте. Такой спектр космологических возмущений плотности (флуктуаций) был предсказан замечательным российским космологом Я. Б. Зельдовичем и независимо от него американским космологом Э. Харрисоном. Теперь он называется спектром Зельдовича—Харрисона или сокращенно HZ-спектром. Контраст плотности в таком спектре пропорционален частоте или, как чаще пишут космологи, волновому вектору (частоте, деленной на скорость звука) волны.

Спектр такого вида был получен Я. Б. Зельдовичем до создания теории инфляции, он был выведен «на кончике пера»

из самых общих предпосылок. Яков Борисович потребовал, чтобы спектр возмущений мог объяснить наблюдаемую энтропию Вселенной и при этом возмущения с таким спектром не производили бы слишком много черных дыр на ранней стадии эволюции Вселенной.

Спектр вида HZ относится к так называемым фрактальным спектрам. Физически понятие фрактального спектра, фрактальной линии возникает, когда мы рассматриваем, например, длину береговой линии в различных масштабах. На картах с грубым масштабом береговая линия кажется гладкой. Рассматривая линию в более мелких масштабах, мы начинаем замечать детали, которые отсутствуют на грубых картах — заливы, поймы речушек и, наконец, ручьи и отдельные камни. При повышении «разрешения» начинают появляться шероховатости и зазубрины, потом мы увидим доменную и кристаллическую структуру береговой линии. Наконец, в еще более мелких масштабах мы входим в мир квантовых законов, в котором отсутствует само понятие границы. Значит, при переходе от одного масштаба к другому длина береговой линии будет нарастать, в пределе устремляясь к бесконечности. Поэтому корректно измерять длину береговой линии, лишь указав, в каком масштабе ведутся измерения.

Важность понятия фракталов (как иногда называют фрактальные линии, фрактальные поверхности, а также спектры) была осознана сравнительно недавно. Значительную роль здесь сыграли работы российского математика Колмогорова и американского математика Мандельброта. Сейчас математики определяют фрактальные множества как множества дробной размерности. Как можно представить себе множество (или пространство) дробной размерности? Пожалуй, одна из лучших аналогий — так называемая «толстая» линия, которая имеет размерность между 1 и 2. Поясним это в нескольких словах. Множество размерности 1 — это прямая линия. Множество размерности 2 — это плоскость. Рассмотрим теперь на плоскости негладкую кривую. Она подобна описанию траектории квантовой частицы (см. главу 5).

Напомним наш пример. Предположим, что мы наблюдаем за движением квантовой частицы невооруженным глазом. Мы видим «толстую» линию, среднее значение которой совпадает

с классической траекторией. Однако, эта «толстая» линия сильно изломана. Вновь вооружимся лупой и обнаружим, что теперь траектория уже не гладкая, она состоит из гладких кусков с изломами. Точнее, в каждом элементе разрешения, допускаемого линзой, линия имеет излом. Однако средняя линия, проведенная по этим кускам, совпадает с классической траекторией. Вооружимся микроскопом и будем рассматривать гладкий кусок линии. Вновь мы обнаружим, что он в свою очередь состоит из кусков меньших размеров, тоже гладких, но с изломами. И так до бесконечности.

Посмотрим теперь, какова размерность получившейся кривой. Последуем идеям Хаусдорфа, который определял размерность такого множества следующим образом. Построим вокруг каждой точки кривой кружочек радиусом $\varepsilon \rightarrow 0$ ¹⁾ и подсчитаем площадь всех кружков $S(\varepsilon)$. Причем площадь перекрывающихся кружков будем учитывать только один раз. Площадь всех кружков будет убывать, хотя бы потому, что мы уменьшаем площадь одного кружка. Но закон убывания будет разный в зависимости от свойств кривой. Если кривая гладкая, то закон убывания, после того как мы выбираем достаточно маленькие кружки (радиус которых меньше изгибов кривой), становится законом вида $S \sim \varepsilon L$, где L — длина кривой. Для кривой, состоящей из одной точки (нульмерного множества), $S(\varepsilon) = \varepsilon^2$. Для плоскости (двумерного множества) $S(\varepsilon) = \varepsilon^0$.

Для фрактальной кривой $S(\varepsilon) \sim \varepsilon^\alpha$. Если $0 < \alpha < 1$, то площадь всех кружочков убывает медленнее, чем для гладкой линии и быстрее, чем для плоскости. Фрактальная кривая занимает промежуточное положение между одномерной кривой и двумерной поверхностью. Поэтому фрактальные кривые называют иногда толстыми линиями. Согласно определению Хаусдорфа размерность такой кривой есть

$$\dim = 2 - \alpha,$$

¹⁾ Стрелка обозначает, что ε стремится к нулю, т. е. мы описываем кружки вокруг каждой точки несколько раз, каждый раз беря кружочек меньшего радиуса.

здесь следует отметить, что так определяется внешняя размерность. Термин «внешняя» означает, что для определения размерности множества нам пришлось выйти за пределы кривой. Существует еще определение внутренней размерности. Внешняя и внутренняя размерности немного отличаются друг от друга, хотя и лежат между двумя ближайшими целыми числами.

Фрактальная кривая однозначно определяется ее спектром. Для физиков понятие фрактальной кривой тесно связано с понятием промежуточной асимптотики, которая строится по обрезанному спектру кривой. Термин «обрезанный спектр» означает, что фрактальную кривую строят не по точному спектру, а по спектру с нулевым вкладом от очень низких частот и нулевым вкладом от очень высоких частот. Со стороны больших длин волн или низких частот спектр обрезается временем наблюдения T_0 (т. е. приравнивается нулю величина спектральных компонент, находящихся левее частоты $\nu = T_0^{-1}$). Со стороны высоких частот спектр обрезается на частоте, определяемой разрешающей способностью прибора ν_r (т. е. приравнивается нулю величина спектральных компонент, находящихся правее частоты ν_r).

Фрактальный спектр Зельдовича—Харрисона неплохо описывает распределение видимой массы во Вселенной как в области малых, так и в области больших масштабов. Конечно, более детальное описание крупномасштабной структуры Вселенной, по-видимому, требует привлечения новых параметров уже в исходном спектре — спектре плотности. Заметим, что даже первичный спектр Зельдовича—Харрисона при расширении и охлаждении Вселенной становится сложнее. В нем возникают характерные масштабы, отвечающие затуханию волн определенной длины, длина свободного пробега частиц и т. п.

Гравитационные волны

Помимо возмущений плотности во Вселенной должен присутствовать стохастический спектр гравитационных волн.

Гравитационные волны (гравитоны) — гипотетические (до сих пор) волны гравитационного поля. Как и электромагнитные волны (фотоны), они распространяются со скоростью света,

способны переносить энергию, импульс, а следовательно, служить источником информации о свойствах вещества. В отличие от фотонов гравитационные волны очень слабо взаимодействуют с веществом и почти не поглощаются им. Эти свойства гравитационных волн особенно важны для космологии, так как благодаря им гравитоны могут приносить непосредственно информацию о самых ранних этапах эволюции нашей Вселенной. С другой стороны, эти же свойства гравитационных волн вызывают трудности, с которыми столкнулись физики при попытках обнаружить гравитационные волны.

Гравитационно-волновая астрономия

Гравитационные волны были предсказаны А. Эйнштейном сразу после создания общей теории относительности. Он также оценил возможности экспериментальной проверки этих предсказаний. Возможности не обнадеживали. Долгое время гравитационные волны служили красивой иллюстрацией единства гравитационного и электромагнитного полей.

Большое внимание было привлечено к ним в 1969 г., когда поступило сообщение Дж. Вебера об открытии импульсов гравитационного излучения из центра Галактики. Уже тридцать лет физики пытаются обнаружить импульсы от коллапса, взрывов сверхновых звезд или слияния нейтронных звезд, но до сих пор безрезультатно.

В 2000 г. в США начал работать самый чувствительный детектор гравитационных волн. Этот детектор сокращенно называется LIGO, что является аббревиатурой слов: лазерная интерферометрическая гравитационная обсерватория. Этот детектор представляет из себя лазерный интерферометр Майкельсона. Он состоит из двух перпендикулярных плеч, которые заканчиваются зеркалами с высоким коэффициентом отражения. В углу интерферометра происходит интерференция лучей света из двух плеч. Измерение гравитационных волн — это измерение высокочастотных искривлений пространства-времени. Такие искривления, видимо, не превышают в безразмерных единицах 10^{-21} – 10^{-23} . Для этого физики и создали интерферометр с плечом длиной

в несколько километров, способный регистрировать смещение зеркал друг относительно друга с точностью лучше, чем 10^{-16} см.

Хотя это проект США, в создание гравитационной обсерватории вносят вклад специалисты многих стран, в частности, России. Россию в проекте LIGO представляет группа профессора В. Б. Брагинского, одного из авторитетнейших современных физиков. LIGO делают в две очереди. Первый детектор будет способен регистрировать высокочастотные искривления пространства-времени на уровне 10^{-21} . Вторая очередь детектора уже будет способна регистрировать искривления пространства-времени в сто раз лучше.

Гравитационное излучение было открыто случайно; произошло это после того, как астрономы открыли двойной пульсар (он был открыт в 1974 г.). В результате десятилетних наблюдений удалось выяснить, что период двойной системы, в которой один из компонентов — пульсар, убывает. Он уменьшается потому, что система теряет энергию из-за гравитационного излучения. Темп замедления периода обращения в точности совпадает с тем, что предсказывает общая теория относительности. Так родилась гравитационно-волновая астрономия.

Основная ее задача — наблюдение прямого воздействия гравитационного излучения на детекторы. Только после этого гравитационно-волновая астрономия прочно займет свое место среди других наук, цель которых познать Вселенную.

Одна из основных проблем, которую должна решить новая наука — исследование фона гравитационных волн, порожденных в ранней Вселенной. Поскольку гравитоны доходят до нас без искажений от эпох, когда температура плазмы была близка к 10^{32} К, то изучение таких гравитационных волн станет мощным инструментом не только в космологии, но и в физике элементарных частиц.

Что такое гравитационно-волновой фон?

Как он возник во Вселенной? Какие параметры имеет сейчас? Какой его частотный диапазон? Вот те вопросы, на которых мы остановимся. Если бы мы могли видеть этот фон, то обнаружили бы, что к нам с разных сторон приходит примерно равное

количество гравитонов, причем их число в каждый промежуток времени случайно. Фон этот должен быть изотропен, так что наблюдателю покажется, что он помещен в центр равномерно освещенной сферы.

Частота этого фона, если пользоваться обычными терминами, соответствует «цвету» сферы, хотя, конечно, в отличие от электромагнитного видимого спектра излучения, где принимаемые фотоны имеют диапазон примерно один микрон, диапазон гравитонов значительно шире. Длина волны самых низкочастотных гравитационных волн, как и возмущений плотности, сравнима с горизонтом Вселенной. Самые высокочастотные гравитоны могут иметь планковскую длину волны 10^{-33} см.

Рождение и эволюция гравитационно-волнового фона

В процессе расширения Вселенной частота гравитационной волны и ее амплитуда постоянно изменяются. Частота всегда уменьшается, амплитуда может как уменьшаться, так и расти. На стадии инфляции амплитуда гравитационных волн росла из-за сверхадиабатического усиления. Такой механизм имеет аналоги в обычной лабораторной физике. Он называется параметрическим усилением.

В результате такого процесса усиления возникает фон гравитационных волн с уже знакомым нам спектром Зельдовича—Харрисона, точнее, спектральный индекс этого фона гравитационных волн чуть меньше, чем у стандартного HZ спектра. Чем длиннее волна, тем больше ее амплитуда. Безразмерная амплитуда гравитационного фона определяется энергией ложного вакуума скалярного поля.

После окончания инфляции на некоторых стадиях эволюции тоже могут реализоваться условия сверхадиабатического усиления. Однако, для каждой волны есть момент времени, после которого амплитуда волны только уменьшается. Это момент равенства длины волны и размера горизонта частиц во Вселенной. Удобно принять такой момент за точку отсчета, тогда наблюдаемую в современный момент времени частоту волны ν_0 можно выразить простой зависимостью от температуры T_g в тот момент

времени:

$$\nu_0 = 2 \cdot 10^{-8} \frac{T_g}{1 \text{ ГэВ}} \text{ Гц.}$$

Приведенное здесь выражение дает связь между температурой эпохи T_g и современной частотой гравитационной волны ν_0 , которая «запомнила» характеристики той эпохи.

Благодаря современным детекторам, работающим на частотах 1 кГц, можно изучать состояние Вселенной при температуре 10^{11} ГэВ, что значительно выше тех энергий, до которых могут разогнать элементарные частицы современные ускорители.

Восстановление потенциала инфляции

Во время инфляции рождаются возмущения плотности и гравитационные волны. Порожденные колебания представляют из себя два независимых стохастических набора волн различной природы.

Поскольку природа генерируемых волн различна, то и зависимость их амплитуд от параметров и характеристик нестационарного процесса, управляющего инфляцией, также различна. Именно это различие позволяет, зная по отдельности амплитуду волн плотности и амплитуду гравитационных волн, восстанавливать различные характеристики потенциала скалярного поля, управляющего инфляцией. Другими словами, это позволяет реконструировать физику элементарных частиц в области энергий 10^{16} ГэВ.

Правила, по которым можно восстанавливать потенциал взаимодействий в этой области энергий, просты. Они были сформулированы несколькими специалистами, в частности группой под руководством знаменитого американского космолога Роки Колба. Несколько лет назад российско-итальянской группой была сделана попытка расшифровать форму потенциала. Успех или неудача? Ответа пока нет.

Модели инфляционной Вселенной

Как уже, вероятно, успел заметить читатель, в книге довольно часто описываются модели Вселенной. Что это такое? Моделью Вселенной в космологии называется теория, в рамках которой удовлетворительно описываются один или несколько основных признаков реальной Вселенной. Скажем, фридмановская модель мира хорошо описывает эволюцию однородной и изотропной Вселенной, хотя сама Вселенная, естественно, значительно более сложное образование.

Слово «модель» пришло в космологию из физики элементарных частиц. В ней также существует много моделей, которые описывают взаимодействия в области высоких энергий. Наличие многих моделей — все равно что существование многих физических теорий, которые описывают эти взаимодействия. Они одинаково хорошо описывают взаимодействия в низкоэнергетической области, скажем, ниже энергий 100 ГэВ, но дают различные предсказания для более высоких энергий взаимодействующих частиц. Происходит так потому, что возможности экспериментальной физики значительно отстают от потребностей теоретической физики.

Такая же ситуация с описанием ранних стадий развития Вселенной. Одно из основных свойств инфляции — постоянство параметра Хаббла в течение некоторого времени (это время Δt должно удовлетворять неравенству $\Delta t H > 70$). Это — необходимое условие. Но этому условию удовлетворяют слишком много моделей. Космологи рассматривают инфляционную стадию, которая обеспечивается одним или двумя скалярными полями,

обладающими массой или не обладающими массой, линейными или нелинейными полями и т. п.

Описать все модели инфляции, даже в специальном труде — задача нелегкая, кстати сказать, и необязательная. Главное отличие одной модели инфляции от другой — в различных видах потенциала скалярного поля или в выборе нескольких скалярных полей, которые создают инфляцию. Здесь я расскажу о нескольких самых интересных моделях инфляции.

«Новый» инфляционный сценарий

Теория инфляционной Вселенной, построенная в 1980-х годах Аланом Гусом, решала проблему горизонта, плоскостности и т. п., но она давала неверные предсказания о характеристиках спектра возмущений плотности. Кстати, автор назвал свое произведение новым словом — сценарий; следуя этому примеру, мы тоже будем употреблять такой термин для обозначения теории. Поэтому Андрей Линде и независимо от него Алан Гус со своим сотрудником П. Стейнхардом разработали новую теорию, назвав ее новым сценарием.

В чем принципиальное отличие двух сценариев инфляции во Вселенной? Главное отличие — в форме потенциала, даже не в самой форме, а в разной форме самой вершины, которая находится вблизи $\phi = 0$ и описывает состояние фальшивого вакуума. В старом сценарии потенциал вблизи нуля имел ямку. Шарик, который представляет состояние поля, закатывается в эту ямку во время предшествующей стадии эволюции и находится в ней достаточно долго для того, чтобы развилась инфляция. После туннелирования (процесс туннелирования объяснялся в главе 8) во Вселенной происходит процесс фазового перехода. В небольшой области пространства начинают образовываться «пузыри» новой фазы — состояния скалярного поля с нарушенной симметрией, которые быстро охватывают все пространство. Вселенная «вскипала» новой фазой. Это так называемый фазовый переход первого рода. Эта модель имела крупный недостаток. Пузыри, заполняя пространство, сталкивались стенками, образуя большой контраст плотности. Для того, чтобы избежать очень больших

флуктуаций плотности, и был придуман новый сценарий инфляционной Вселенной.

Потенциал скалярного поля в новом инфляционном сценарии изображен на рис. 10.1. В начале координат, при состоянии фальшивого вакуума, потенциал почти плоский.

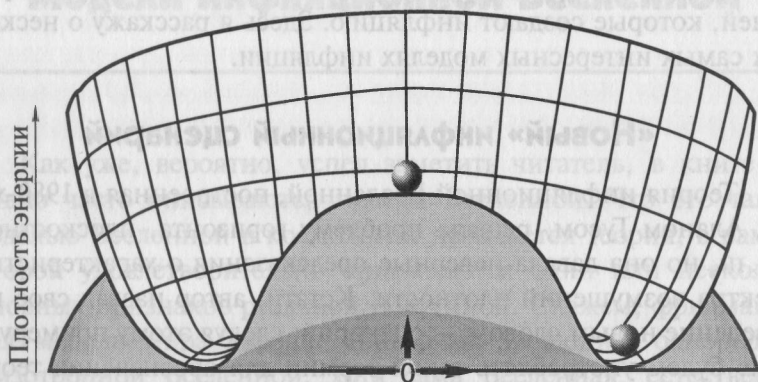


Рис. 10.1. На рисунке изображена форма потенциальной энергии дублета скалярных полей. Теперь энергетический барьер на вершине потенциала, которая соответствует состоянию ложного вакуума, отсутствует. Шарик, изображающий потенциальное поле, в начале инфляции находится «почти» точно в центре, или попадает недалеко от центра из-за флуктуаций скалярного поля. Потенциал в этом месте имеет очень пологий склон. Шарик катится по такому склону медленно. Во время скатывания энергия ложного вакуума почти постоянная, параметр Хаббла меняется очень мало, происходит инфляция

Вновь вспомним наши аналогии между состоянием скалярного поля в потенциале определенной формы и шариком, который скатывается по поверхности такой же формы в однородном гравитационном поле. Шарик, положенный на такую поверхность, будет катиться по ней достаточно долго, прежде чем скатиться в нижний желоб, который соответствует состоянию истинного вакуума в нашем мире. В англоязычной литературе за таким режимом закрепился термин «slow-rolling», мы тоже будем употреблять этот термин, только в переводе на русский язык — режим медленного скатывания.

Скалярное поле за время скатывания меняется достаточно сильно, а потенциальная энергия поля практически не меняется!

Значит, остаются постоянными скорость расширения Вселенной и величина параметра Хаббла.

Скатывание шарика в желоб соответствует нарушению симметрии состояния скалярного поля, образованию масс у элементарных частиц, переходу поля из состояния ложного вакуума в состояние истинного вакуума, концу инфляции и началу фридмановского режима расширения.

При скатывании поля вниз по потенциалу из малых вакуумных флуктуаций скалярного поля образуются флуктуации значительно меньшие по амплитуде, чем прежде; они формируют перепады плотности на уровне 10^{-4} от средней плотности. Однако этого контраста плотности достаточно, чтобы уже в наши эпохи сформировалась крупномасштабная структура Вселенной, галактики, звезды в галактиках, наконец, планеты, и возникла жизнь на них.

Новый инфляционный сценарий прожил несколько лет.

Вечная или хаотическая инфляция

Если первая модель инфляции, которую придумал А. Гус, была основана на потенциале, который космологи «позаимствовали» у физиков, то уже «новый сценарий» был основан на потенциале, придуманном самими космологами. Скалярное поле и его потенциал, найденные физиками, как оказалось, не могли вписаться в космологию.

Идея инфляции оказалась столь продуктивной, что астрономы и физики предпочли отказаться от того пути, который подсказывался развитием теории элементарных частиц, и изобретать свои собственные модели, связанные только с космологией, но не связанные с описанием физических взаимодействий.

Для скалярного поля, которое создавало инфляцию в ранней Вселенной, был придуман специальный термин «инфлатон». Связь его с физикой элементарных частиц долгое время не обсуждалась. Так произошло сильное изменение взглядов космологов на теорию ранней Вселенной.

Вскоре Андрей Линде придумал новый сценарий «вечная инфляция». Для обоснования этого сценария он взял потенциал простейшего вида: скалярное поле без самодействия, но с массой. Масса была выбрана небольшой для того, чтобы склон потенциала был пологим. Это был первый пример потенциала без состояния с фальшивым вакуумом. Скалярное поле имело только одно вакуумное состояние, которое находилось как и у всякого поля при нулевом значении амплитуды поля.

Вновь вернемся к нашей аналогии с шариком, который катится по параболе. Если поверхность очень покатая, то шарик катится медленно. Реализуется режим «медленного скатывания».

Вспомним теперь о параметрическом усилении флуктуаций скалярного поля, описанном в предыдущей главе для того, чтобы подробнее описать эволюцию скалярного поля в одной точке пространства.

Флуктуация скалярного поля представляет из себя волну. Эволюция волн в расширяющейся Вселенной отличается от эволюции волн на стационарном пространстве-времени. Плоская волна в плоском пространстве времени распространяется, не изменяя своих основных характеристик — амплитуды и длины волны. В расширяющемся пространстве амплитуда волны изменяется по адиабатическому закону (обратно пропорционально масштабному фактору), если отсутствует механизм усиления волны. Длина волны всегда увеличивается по адиабатическому закону.

В эпоху, когда длина волны меньше, чем размер горизонта Вселенной, амплитуда меняется по адиабатическому закону, не усиливаясь. В эпоху, когда длина волны больше горизонта, могут работать механизмы усиления. Во время инфляции работает механизм параметрического усиления. Размер горизонта Вселенной во время инфляции — величина приблизительно постоянная. Длина волны растет пропорционально масштабному фактору. Волна, длина которой была первоначально короче, чем размер горизонта, растягивается общим расширением и становится длиннее размера горизонта. Начиная с этого момента, ее амплитуда «замораживается». Она остается примерно постоянной вплоть до момента окончания инфляции (если он

наступает)¹⁾. Волны скалярного поля складываются. Конечно, знак волны зависит от ее фазы, которая является случайной величиной (это свойства случайных полей, в частности случайного возмущения плотности). Поэтому значение скалярного поля в выбранной точке пространства может как расти, так и убывать. Для нас важно, что значение скалярного поля может расти.

Скалярное поле на потенциале, который имеет форму как на рис. 10.2, меняется из-за двух причин. Первая — «скатывание» скалярного поля к положению равновесия, которое лежит при $\phi = 0$. Поле из-за «скатывания» уменьшает свою величину. Вторая причина — изменение амплитуды поля из-за роста флуктуаций. Поле может как расти, так и уменьшаться. Если амплитуда поля уменьшается из-за процесса усиления флуктуаций, то уменьшение амплитуды поля, вызванное процессом «скатывания», складывается с уменьшением амплитуды поля из-за усиления флуктуаций, приближая конец инфляции.

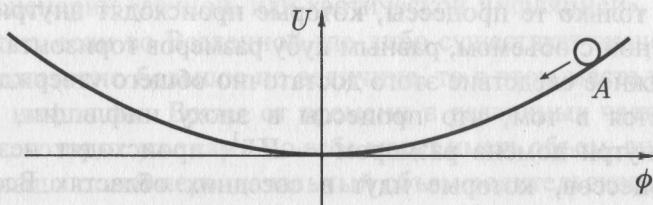


Рис. 10.2. Здесь изображен потенциал простейшего вида. Он представляет функцию, которая зависит от поля ϕ квадратичным образом. График представляет из себя параболу, которая проходит через ноль. Форма кривой зависит только от одного параметра — массы скалярного поля. Она выбрана небольшой, чтобы потенциал являлся пологой кривой. Шарик, изображающий потенциальное поле, в начале инфляции находится «почти» на склоне в точке A. Из-за того, что кривая является полой, скалярное поле «скатывается» к положению равновесия медленно. Медленное скатывание гарантирует медленное изменение параметра Хаббла, расширение Вселенной почти по закону экспоненты и рождение небольших возмущений плотности

¹⁾ Постоянство амплитуды означает рост на фоне адиабатического уменьшения амплитуды другой волны, длина которой значительно меньше размеров горизонта.

Процессы значительно интереснее возникают в том случае, когда изменение амплитуды поля из-за скатывания и из-за усиления флуктуаций имеют разные знаки.

Если значение скалярного поля значительно превышает планковское значение, скажем, $\phi \sim 10^4 m_{\text{pl}}$, то рост флуктуаций этого поля будет больше, чем убывание величины поля из-за «скатывания»! Поле начнет медленно «карабкаться» вверх по склону. Конечно, для реализации такого процесса инфляции необходимо несколько условий, в частности, малое значение собственной массы поля.

Важная особенность эпохи инфляции состоит в том, что области Вселенной, разделенные расстоянием, большим чем размер горизонта частиц H^{-1} , эволюционируют практически независимо друг от друга. Так происходит потому, что две точки, разделенные расстоянием, большим чем горизонт, удаляются друг от друга со скоростью, превышающей скорость света! Надо заметить, что противоречия со специальной теорией относительности здесь нет. Скорость удаления v не является скоростью какого-либо сигнала. Как следствие, любой наблюдатель сможет видеть только те процессы, которые происходят внутри домена Вселенной с объемом, равным кубу размеров горизонта.

Важное следствие этого достаточно общего утверждения заключается в том, что процессы в эпоху инфляции, которые идут внутри домена размером $\sim H^{-1}$, происходят независимо от процессов, которые идут в соседних областях Вселенной. Расширение двух областей, разделенных расстоянием порядка H^{-1} , не сводится к проникновению одной области на территорию другой, не сводится к «пожиранию» одного домена другим. Расширение каждой из областей происходит внутри объема, допускаемого общей теорией относительности. Поэтому каждый домен с начальным размером, превышающим H^{-1} , может рассматриваться как отдельная Вселенная.

Теперь рассмотрим эволюцию такой мини-Вселенной с учетом растущих квантовых флуктуаций скалярного поля. Для начального значения скалярного поля, превышающего на много порядков планковское значение, вся Вселенная условно «разбита» на отдельные области порядка H^{-1} . Возьмем одну область.

За время порядка $\Delta t \sim H^{-1}$ объем рассматриваемого домена вырастет в $e^3 \approx 30$ раз, он окажется разделенным на 30 отдельных доменов, в которых эволюция будет протекать независимо. В выделенном домене усилятся флуктуации скалярного поля. Примерно в половине субдоменов их знак совпадет со знаком среднего изменения скалярного поля и в таких субдоменах инфляция начнет прекращаться. В другой половине знак флуктуаций поля окажется противоположным знаку среднего изменения. В таких субдоменах скалярное поле вырастет по абсолютной величине. Инфляция в них продолжится. В следующий интервал времени порядка $\Delta t \sim H^{-1}$ объем каждого субдомена, в котором инфляция продолжается, вырастет опять примерно в 30 раз, а скалярное поле в 15 новых субдоменах уменьшится по абсолютной величине, что в нашем рассмотрении означает прекращение инфляции, а в 15 останется на прежнем уровне или даже увеличится.

В модели с правильным подбором параметров объем, в котором постоянно идет инфляция, окажется **больше**, чем объем, в котором инфляция уже закончилась. Андрей Линде назвал такой сценарий «вечной, или хаотической инфляцией».

Итак, если во Вселенной где-либо существует значение поля ϕ достаточно большое по величине, то в этом месте начнется вечная инфляция. Время от времени в различных частях этого домена, которые уже сами по себе могут иметь объем, значительно превышающий первоначальный объем родительского домена, скалярное поле устремляется к нулю, инфляция заканчивается, но в соседях этого субдомена инфляция, тем не менее, будет продолжаться вечно.

Вполне возможно, что наша Вселенная устроена именно таким образом. Естественно, что мы с вами живем в области Вселенной, которая много миллиардов лет назад покинула режим вечной инфляции, но не исключено, что за горизонтом нашей части Вселенной, в сверхкрупных масштабах существуют области, гораздо **бóльшие** по объему, в которых инфляция продолжается до сих пор.

Конечно, все эти вселенные (или части одной единой Вселенной) являются причинно разьединенными. Никакое событие

в нашей части Вселенной не окажет влияние на эволюцию тех бесконечно далеких частей единой Вселенной (см. рис. 10.3).

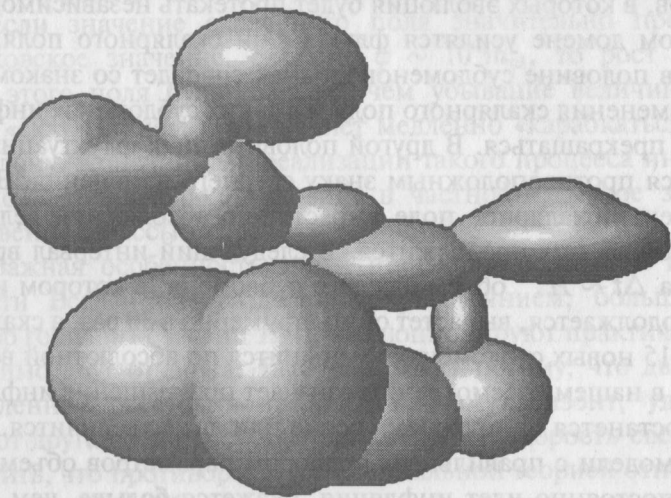


Рис. 10.3. Здесь изображено возможное строение нашей единой Вселенной в сверхбольших масштабах

С начала работы над различными инфляционными сценариями (или моделями эволюции ранней Вселенной) прошло почти двадцать лет. Сейчас число инфляционных сценариев исчисляется десятками. Многие свойства мира, расширяющегося по закону экспоненты, стали понятны значительно лучше. Выяснилось, что при определенных условиях можно получить решение проблемы горизонта, но при этом параметр плотности Ω может быть не точно равен единице, а, скажем, несколько меньше единицы. Космологи построили много моделей, каждая из которых достаточно хорошо описывает те свойства Вселенной, которые мы уже знаем. Одновременно эти модели предсказывают много других интересных свойств, перед которыми бледнеет самая увлекательная научная и околонаучная фантастика.

Однако я увлекся перечислением возможных моделей нашей Вселенной. Пора вновь перейти если не к твердо установленным фактам реального мира, то по крайней мере к тем, которые являются общепризнанными в сообществе физиков и космологов.

Барионная асимметрия

Барионная асимметрия Вселенной

Сразу после окончания инфляции, после распада ложного вакуума, запасенная в нем потенциальная энергия выделилась в виде горячей плазмы, состоящей из большого числа тяжелых элементарных частиц. Если к концу инфляционной стадии температура окружающей среды была практически равной нулю, то теперь вся потенциальная энергия выделяется в тепло. Появляется плазма со средней температурой $T \sim 10^{16}$ ГэВ.

Естественно, природа этих частиц, их количество, а также законы их взаимодействия сейчас неизвестны. Можно описать лишь самые общие свойства. Одно из таких свойств здесь будет описано, и оно вплотную касается нашей эпохи. Речь пойдет о материи и антиматерии.

Астрономические наблюдения показывают, что во Вселенной практически отсутствует антивещество. Мы уверенно говорим, что наша Галактика целиком состоит из вещества, так как в противном случае аннигиляция вещества и антивещества сопровождалась бы выделением огромного количества энергии, что было бы замечено. Аналогично можно сделать вывод о других галактиках. Так, ближайшие к нам карликовые галактики: Большое Магелланово Облако (БМО) и Малое Магелланово Облако (ММО) соединяются с нашей Галактикой гигантскими перемычками материи. В этих светящихся перемычках видны только обычные процессы излучения и переизлучения, происходящие в межзвездном веществе. Кроме того, известны сталкивающиеся галактики, галактики, входящие в скопления, «омываемые»

одним облаком межгалактического газа, и во всех этих случаях процессов аннигиляции не обнаружено.

Все эти факты лежат в основе проблемы барионной асимметрии Вселенной. Это означает, что во Вселенной присутствуют барионы (протоны, нейтроны) и практически отсутствуют антибарионы (антипротоны и антинейтроны). Разумеется, ученые, наблюдающие космические лучи, регистрируют некоторое количество антипротонов, но они образуются при взаимодействиях элементарных частиц высоких энергий с окружающим нас веществом.

Явление барионной асимметрии кажется особенно загадочным также потому, что количество протонов n_p значительно меньше количества реликтовых фотонов n_γ :

$$\frac{n_p}{n_\gamma} = 10^{-9} - 10^{-10}.$$

Это означает, что на горячей стадии, когда температура окружающей плазмы была значительно больше, чем энергия покоя протона, $kT \gg m_p c^2$, в первичной термодинамически равновесной плазме существовало примерно равное количество протонов n_p и антипротонов $n_{\bar{p}}$:

$$\frac{(n_p - n_{\bar{p}})}{n_p} = 10^{-9} - 10^{-10}.$$

Точнее, при таких температурах надо говорить об избытке кварков над антикварками, но сам факт от этого не меняется. Существование всего нашего мира и нас, в частности, обязано крошечному преобладанию частиц над античастицами. Если бы в ранней Вселенной количество частиц в точности бы равнялось количеству античастиц, то при остывании первичной плазмы до температур меньше нескольких сотен мегаэлектронвольт процессы аннигиляции привели бы к тому, что наш мир состоял бы только из фотонов. Протонов, электронов и нейтронов не было бы вообще!

Еще тридцать лет назад происхождение этой небольшой разницы в плотности материи и антиматерии рассматривалась как начальное условие, не определяемое законами физики. Сейчас господствует противоположная точка зрения, согласно которой

эта асимметрия рассматривается как проявление законов взаимодействий физики элементарных частиц.

Распад протона

Подавляющее большинство известных элементарных частиц нестабильны¹⁾. Свободные элементарные частицы распадаются за короткое время, рождая новые частицы, часть из которых опять-таки нестабильна. Распад их происходит до тех пор, пока не образуются только стабильные частицы. Стабильные частицы — это протон, электрон, нейтрино, антинейтрино и фотон. Даже нейтрон в свободном состоянии не является стабильной частицей, он распадается со средним временем жизни несколько минут. В атомных ядрах нейтрон является стабильным из-за дефицита энергии.

Однако для объяснения барионной асимметрии Вселенной критическим шагом является предположение о несохранении количества барионов, о нестабильности протона.

Требование нестабильности протона — чисто космологическое. Все физические эксперименты до сих пор показывают, что протон является стабильной частицей. Самым ярким свидетельством в пользу стабильности протона до сих пор была стабильность атомных ядер. Эксперименты, проводимые на ускорителях элементарных частиц, показывают, что рождение протонов p в каких-либо реакциях обязательно сопровождается рождением антипротонов \bar{p} :

$$\pi^+ + p \rightarrow p + p + \bar{p} + \pi^+.$$

Эксперименты, проведенные с элементарными частицами высоких энергий, значительно превышающих массу покоя протона, тоже показывают (правда, уже на уровне элементарных частиц) сохранение барионного числа (что свидетельствует о стабильности протона):

$$p + p \rightarrow p + \Lambda^0 + K^+, \quad \Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-.$$

¹⁾ Здесь мы используем термин «элементарные» частицы для обозначения значительно большего класса частиц, чем те, о которых речь шла в главе 6, и которые именуются «фундаментальными элементарными» частицами.

Физики различных стран проводили эксперименты по поиску распада протона. Эксперимент показывает, что время его жизни в лабораторных условиях превышает 10^{31} лет.

Как смогли померить такое время, когда время жизни Вселенной (20 млрд лет) на много порядков меньше? Для обнаружения распада протона не обязательно ждать 10^{31} лет. Распад одного выделенного протона может произойти в любое время. Он может распасться и через секунду после начала наблюдения за ним, а может остаться стабильным в течение времени, значительно превышающего его время жизни. Однако, если физик-экспериментатор соберет вместе 10^{31} протонов, то с уверенностью можно сказать, что в течение одного года один из такого числа протонов должен претерпеть акт распада.

Один кубический метр воды содержит примерно 10^{30} протонов. Так что собрать вместе 10^{31} протонов не так уж и сложно — необходимо закачать в бак 10 т воды. Сложность таких экспериментов состоит в том, что необходимо заметить один акт распада в течение года.

Один из самых знаменитых экспериментов проводился совместно японскими и индийскими исследователями в Kolar Gold Field (KGF). Для поиска распада протона они оборудовали два детектора, первый из которых имел вес 140 т, а второй 260 т. Первый был оборудован в шахте на глубине 2 300 м, второй — на глубине 2 000 м. Заглубление детекторов сильно понижало фон космических лучей и позволяло проводить регистрацию распадов.

Исследователи искали распады типа:

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0; \quad p \rightarrow \bar{\nu} + K^+; \quad K^+ \rightarrow \mu^+ \nu; \quad K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

и т. п.

Первый детектор начал работать в октябре 1980 года, а второй в ноябре 1985 г. Было обнаружено всего десять событий, которые могли бы интерпретироваться как происшедшие акты распада протона. К сожалению, остаточный фон космических лучей и радиоактивных распадов в земной коре не позволяет с уверенностью сказать, какие именно события произошли. Поэтому

исследователи смогли указать лишь верхний предел на время жизни протона; по их оценкам он составляет $2 \cdot 10^{31}$ лет.

Итак, все эксперименты указывают на тот факт, что протон является стабильной частицей. Почему же космологи настаивают на том, что протон должен быть нестабильным, почему физики в большинстве своем тоже приняли эту точку зрения?

Протон должен быть нестабильным

Сравним закон сохранения электрического заряда и предположение о сохранении числа барионов. Эти два явления должны иметь много общего. Однако между ними имеется важное различие. Электрический заряд служит источником электромагнитного поля. Плотность электрического заряда входит в уравнения электромагнитного поля в качестве источника фотонов, которые обладают нулевой массой. Причем из самосогласованности уравнений электромагнитного поля вытекает закон сохранения электрического заряда. В случае если этот закон сохранения не выполнялся в какой-либо ситуации, исследователи или инженеры, которые используют электромагнитные приборы, давно бы заметили различие между теоретическими формулами и экспериментальными данными. Скажем, телезрители не смогли бы принимать передачи Останкинской башни из-за несохранения электрического заряда, а следовательно, сильного поглощения по пути следования радиолуча.

Аналогичных уравнений, которые описывают связь барионного числа с бозонами, обладающими нулевой массой покоя, нет. Физики неоднократно искали так называемую «пятую силу», которая могла бы отвечать за взаимодействие такого рода. Несмотря на тщательные поиски безмассового поля (и соответственно, дальнего действия), связанного с сохраняющимся барионным числом, оно не было обнаружено. Поэтому аргументов столь же твердых, как для сохранения электрического заряда, у физиков нет. Более того, модели объединения физических взаимодействий предсказывают, что барионное число должно быть несохраняющейся величиной.

Горячий бариосинтез

Для возникновения барионной асимметрии Вселенной помимо несохранения барионного числа требуется нестационарность Вселенной и различие в свойствах частиц и античастиц. В отличие от гипотезы несохранения барионного числа, оба эти явления надежно установлены. Идея образования барионного избытка из-за действия такого механизма была высказана А. Д. Сахаровым более тридцати лет назад. Конкретные схемы ее реализации были детально разработаны советскими учеными В. А. Кузьминым, а также А. Д. Долговым и Я. Б. Зельдовичем.

Если барионное число не сохраняется, а взаимодействия частиц и античастиц абсолютно одинаковы, т. е., как говорят физики, имеет место C -инвариантность, то избыток барионов над антибарионами не возникнет. Более того, в горячей плазме, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, будет одинаковое количество частиц и античастиц независимо от сохранения или нарушения C -инвариантности. Этот факт является следствием так называемой CPT -теоремы, которая утверждает, что должна существовать инвариантность при совместном пространственном отражении, обращении времени и переходе от частиц к античастицам. CPT -теорема является следствием самых общих свойств физической теории, таких как лоренц-инвариантность и аналитичность. CPT -теорема гласит, что должны быть одинаковы массы, времена жизни и статистические веса частиц и античастиц. Это и приводит к одинаковому содержанию частиц и античастиц одного сорта в термодинамически равновесной плазме. Правда, надо сделать одну оговорку. Если данный сорт частиц обладает сохраняющимся зарядом (в числе которых вполне можно рассматривать и число барионов) и средняя плотность этого заряда с самого начала не равна нулю, то в любом состоянии плазмы в ней будет присутствовать этот избыток частиц над античастицами. Так, если внутри лабораторной колбы (конечно, сделанной из абсолютно нерасплавляемого материала!) создать плазму, обладающую избытком электрического заряда, то этот избыток не будет зависеть ни от температуры плазмы, ни от ее эволюции.

Число барионов, как полагают, не сохраняется, поэтому, независимо от начального значения избытка барионов над антибарионами, горячая плазма должна прийти в равновесное состояние, когда количество барионов равно количеству антибарионов. Однако Вселенная нестационарна, она расширяется, поэтому в ней возникает отклонение от равновесия, определяемое скоростью расширения мира (постоянной Хаббла в тот момент времени) и характерной скоростью реакций между частицами, которые поддерживают равновесие.

Величина отклонения от термодинамического равновесия зависит от массы частиц. Для безмассовых частиц, таких, например, как фотоны, отклонения от термодинамического равновесия не возникает²⁾. Для массивных частиц отклонение пропорционально квадрату массы покоя m , разделенной на температуру плазмы T в текущий момент времени. Для легких частиц отношение $\frac{m^2}{T^2}$ достаточно мало, для тяжелых частиц оно может быть велико. Правда, сама концентрация тяжелых частиц мала, поэтому их роль в бариосинтезе малозаметна. Значит, бариосинтез должен происходить во Вселенной, когда температура окружающей плазмы примерно равна массе покоя частиц, которые являются переносчиками взаимодействий, приводящих к нарушению C -инвариантности — к несохранению барионного числа.

Такие частицы в теории горячего бариосинтеза называются тяжелыми X -, Y -лептокварками. Эти частицы нестабильны и должны распадаться вскоре после рождения.

Поэтому разница между барионами и антибарионами как функция времени может выглядеть так. В начальный момент значение этой разницы может быть произвольным, зависящим от механизма «сотворения мира». Затем эта разница должна исчезать по мере достижения плазмой равновесного состояния. Вскоре после рождения нашей Вселенной начинается стадия инфляции, во время которой температура понижается практически до нуля, а вся материя во Вселенной «растаскивается» силами отталкивания на расстояния, значительно превышающие горизонт

²⁾ Это мы можем наблюдать на примере реликтового излучения.

событий на тот момент, так что остаточная плотность барионов к концу стадии инфляции также пренебрежимо мала. После окончания стадии инфляции, распада материи из состояния ложного вакуума в состояние с нарушенной симметрией, возникает горячая плазма, состоящая из различных частиц, включая тяжелые лептокварки. Степень отклонения их распределения от равновесного нарастает и при охлаждении Вселенной до температуры ниже массы покоя таких лептокварков остается небольшой избыток барионного заряда, «спрятанный» в лептокварках. Лептокварки являются нестабильными частицами, поэтому после их распада остается небольшой избыток кварков над антикварками.

Механизм, за счет которого поддерживается равновесие в горячей плазме, а также идут распады, имеет много общего с механизмом химических реакций. Скорость определяется плотностью частиц, вступающих в реакции, массами частиц, а также сечением их рассеяния друг на друге.

Холодный бариогенез

В современной физике элементарных частиц существует довольно много возможностей для объяснения избытка вещества над антивеществом. Несколько физических механизмов приводят к появлению этого избытка. Здесь нет нужды перечислять все эти механизмы. Некоторые из них настолько экзотичны, что только сами авторы таких механизмов верят в них и разрабатывают соответствующие теории. Однако один из новых физических механизмов генерации бариоизбытка в ранней Вселенной необходимо осветить. Он был «изобретен» сравнительно недавно и называется теперь механизмом «холодного бариогенеза». Основной вклад в разработку теории бариогенеза внесли российские ученые В. А. Кузьмин, В. А. Рубаков и швейцарский ученый М. Е. Шапошников.

В отличие от горячего бариосинтеза, которой происходил во Вселенной, когда ее температура составляла 10^{16} ГэВ, стадия бариогенеза происходит во Вселенной, когда ее температура значительно ниже, в этот момент температура составляет «всего лишь» $10 \text{ ТэВ} = 10^4 \text{ ГэВ}$.

В чем принципиальное отличие механизма холодного бариогенеза от физического механизма горячего бариосинтеза? Читатель, наверное, обратил внимание, что даже сами термины, обозначающие две эпохи, являются различными. Синтез означает производство какого-либо вещества. Генезис — это греческое слово, означающее бытие. Во время горячей стадии бариосинтеза избыток барионов над антибарионами «варится» в котле первичной плазмы с невообразимо высокой температурой. Во время стадии «холодного» бариогенеза избыток вещества над антивеществом образуется как следствие случайного выбора вакуумом физических полей нашей Вселенной какого-либо минимума, который и определяет величину избытка.

Структура вакуума в так называемых абелевых теориях поля тривиальна — вакуум имеет только один минимум. Если обозначить величину поля ϕ , то энергия, которой будет обладать это поле, пропорциональна квадрату величины ϕ . Это справедливо для многих типов физических полей, в частности для электромагнитного. Когда $\phi = 0$, поле отсутствует или, как говорят физики, есть только вакуум³⁾. Для нелинейных полей с нарушенной симметрией существует, по крайней мере, два вакуума. Они разделены высоким потенциальным барьером.

Поля в современных неабелевых теориях поля имеют сложную топологическую структуру, обладающую, вообще говоря, бесконечным набором минимумов, разделенных потенциальными барьерами. Физики интерпретируют такую структуру как бесконечный набор вакуумов, обладающих различными свойствами. В частности, обладающих различными избытками барионов над антибарионами.

В современное время два различных минимума отделены друг от друга не большим расстоянием или промежутком времени, а большим потенциальным барьером. Так, если физик захочет проверить наличие таких нетривиальных минимумов в лаборатории и наблюдать процессы с несохранением барионного числа, ему придется нагреть кусочек плазмы до температуры 10 ТэВ.

³⁾ Напомним, что из-за нулевых колебаний полей энергия вакуума, вообще говоря, нулю не равна, но имеет минимум.

После того, как энергия плазмы приблизится к величине 10 ТэВ на частицу, в ней начнут активно идти процессы с нарушением барионного числа.

В обычных лабораторных условиях вероятность для наблюдения таких процессов составляет исчезающе малую величину 10^{-150} . Для наблюдения распада протона из-за такого механизма необходимо было бы собрать вместе 10^{150} протонов! Здесь уместно напомнить, что полное количество протонов внутри наблюдаемой части Вселенной несколько меньше.

В отличие от механизма горячего бариосинтеза, механизм холодного бариогенеза вскоре можно будет проверить экспериментально. Через несколько лет начнут работать гигантский ускоритель элементарных частиц, который сейчас строится в ЦЕРНе, Швейцария. Энергия ускоренных протонов в нем будет превышать 10 ТэВ. Другими словами, экспериментаторы получат в свое распоряжение машину, способную нагреть кусочек вещества до температур 10 ТэВ. При столкновениях частиц, ускоренных навстречу друг другу, физики должны наблюдать весьма интенсивные процессы с нарушением барионного числа, если современные теоретические взгляды на природу физики в области энергии 10 ТэВ справедливы.

Реликтовое излучение

Что такое реликтовое излучение

Гипотезу о существовании реликтового излучения высказал в 1946 г. Г. А. Гамов. Он разрабатывал теорию нуклеосинтеза в горячей Вселенной и предсказал существование теплового электромагнитного излучения со спектром абсолютно черного тела и оценил его температуру (6 К). Наблюдения подтвердили, что это излучение имеет спектр абсолютно черного тела, и была определена его температура (2,725 К).

Наблюдение реликтового излучения в 1965 г. явилось важнейшим космологическим фактом после открытия Хабблом расширения Вселенной.

В прошлом наша Вселенная была значительно горячее и представляла из себя высокотемпературную плазму с температурой вплоть до 10^{32} К. Частицы, составляющие эту плазму, находились в равновесии. Одной из таких частиц был фотон. В ту эпоху у фотонного газа сформировался спектр абсолютно черного тела с температурой, равной температуре окружающей плазмы. В ходе расширения температура фотонов постоянно понижалась.

После понижения температуры плазмы до 3 000 К начинается эпоха рекомбинации и образуется нейтральный водород. Сечение его взаимодействия с фотонами, вне узких линий, пренебрежимо мало и фотоны начинают распространяться во все стороны практически свободно. Этот момент времени называют также эпохой последнего рассеяния или, иногда, эпохой просветления. Если считать, что сейчас возраст Вселенной 10^{10} лет, то к эпохе рекомбинации прошло «только» 300 000 лет. Свет

за это время успевает пройти только 300 кпк, и этот размер называется размером горизонта частиц во время рекомбинации¹⁾. Физический смысл длины горизонта частиц прост — это размер причинно связанной области к некоторому моменту времени. Всякое взаимодействие распространяется не быстрее, чем свет, поэтому за время, истекшее с начала Большого Взрыва, две частицы успевают провзаимодействовать, если расстояние между ними не больше горизонта частиц. Другими словами, равновесие, определяемое любым физическим процессом, устанавливается на масштабах не более 300 кпк на момент рекомбинации. Это значит, что плазма в точках, разделенных масштабом, скажем, 10 Мпк, может различаться по температуре во много раз. Оговоримся сразу, что наблюдения показывают высокую степень изотропии на всех угловых масштабах, включая масштаб горизонта частиц на стадии рекомбинации. Этот факт является прямым следствием инфляционной стадии развития нашей Вселенной.

Угловой размер горизонта частиц на момент рекомбинации $\sim 2^\circ$. Это важная характеристика. Она определяет положение максимума в доплеровском пике.

Спектр реликтового излучения — это спектр абсолютно черного тела с температурой $T = 2,725$ К. Вид функции, описывающий спектральную энергию как функцию частоты, показан на рис. 12.1.

Космологи-экспериментаторы измеряли температуру реликтового излучения многократно и в широком диапазоне длин волн. Эти наблюдения проводились для того, чтобы подтвердить вид спектра и обнаружить отклонения от него, если они существуют.

Отклонения могли образовываться, если во Вселенной происходили неравновесные процессы. Пусть, например, в какой-либо момент эволюции, не слишком далеко отстоящий от стадии рекомбинации, в плазме выделялась энергия. Скажем, в плазме были нестабильные элементарные частицы, которые распались до рекомбинации. Тогда во Вселенной выделились фотоны, обладающие узким спектром. Они взаимодействуют с электронами,

¹⁾ Подчеркнем, что здесь вычислен размер горизонта на момент рекомбинации.

переизлучаются и меняют свою энергию. Процессы перераспределения приводят к тому, что «впрыснутый» спектр фотонов расплывается и его форма стремится к равновесному спектру черного тела (так, собственно, и формируется спектр абсолютно черного тела). Через некоторое время в плазме вновь наступит равновесие между фотонами и другими частицами. Но может оказаться, что времени для установления равновесия не хватит. Тогда в спектре реликтового излучения возникнет избыток, который укажет не только время выделения дополнительной энергии, но и его механизм.

Избыток энергии, отложенный на кривой, описывающей спектр абсолютно черного тела, глазом заметить нельзя. Чаще всего астрономы откладывают яркостную температуру как функцию частоты излучения. Для идеального спектра планковского типа эта температура не зависит от частоты. Результаты последних измерений представлены на рис. 12.2. Видно, что температура постоянна в пределах ошибок.

Отклонения от планковского закона, которые предсказываются современной теоретической космологией, должны быть значительно меньше. Поэтому тот факт, что мы не обнаруживаем значительных отклонений от спектра, является положительным фактом. Он свидетельствует, что космологи правильно понимают основные процессы, которые порождают реликтовое излучение.

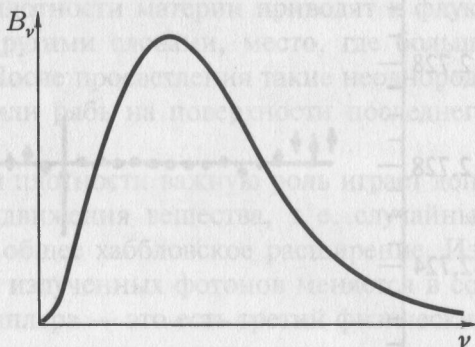


Рис. 12.1. Спектр абсолютно черного тела. По вертикальной оси отложены спектральная плотность энергии, по горизонтальной частота излучения. Количество энергии, излучаемое таким телом на частоте ν и в диапазоне частот $\Delta\nu$, вычисляется как произведение абсциссы графика на интервал $\Delta\nu$. У спектра существует максимум. Часть спектра до максимума называется релей-джинсовской частью спектра. Часть правее максимума называется виновой частью спектра абсолютно черного тела

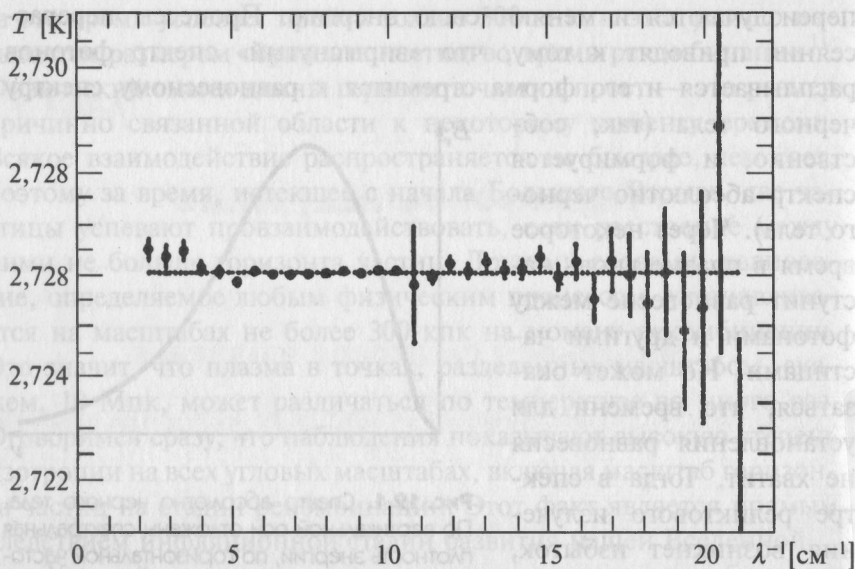


Рис. 12.2. График зависимости температуры реликтового излучения от частоты. По вертикальной оси отложена температура излучения, выраженная в милликельвинах. По горизонтальной оси отложена частота, на которой велись измерения, выраженная в см^{-1} . Для того чтобы пересчитать эту величину в Гц, необходимо умножить ее на скорость света. После этого частота, скажем, равная 1 см^{-1} , соответствует частоте 30 ГГц

Анизотропия реликтового излучения

Анизотропия — это разница температуры реликтового излучения в различных направлениях на небе. Она возникает из-за нескольких физических механизмов. Перечислим их. Прежде всего это эффект Сакса—Вольфа. Он возникает, когда фотон распространяется в неоднородном гравитационном поле. Если фотон движется по нарастающему гравитационному потенциалу он теряет свою энергию и испытывает красное смещение, если он движется по убывающему потенциалу он приобретает энергию и его частота смещается в голубую часть спектра. Для одного фотона этот эффект приводит к изменению частоты, для ансамбля фотонов — к изменению их температуры.

Второй эффект — эффект Силка. Он возникает для адиабатических флуктуаций плотности. Если энтропия плазмы (т. е. отношение числа барионов к числу фотонов) однородна по пространству, то флуктуации плотности материи приводят к флуктуациям числа фотонов. Другими словами, место, где больше плотность, будет горячее. После просветления такие неоднородности выглядят как муар или рябь на поверхности последнего рассеяния.

Наряду с изменениями плотности важную роль играет доплер-эффект пекулярного движения вещества, т. е. случайные движения, наложенные на общее хаббловское расширение. Из-за этого движения энергия излученных фотонов меняется в соответствии с эффектом Доплера — это есть третий физический механизм, вызывающий анизотропию реликтового излучения.

Не связанным непосредственно с возмущениями метрики в эпоху рекомбинации, но важным при описании эволюции Вселенной при относительно низких значениях красного смещения $z \sim 5-10$ является эффект Сюняева—Зельдовича. Он возникает, когда реликтовые фотоны проходят через облако горячих электронов и в результате актов рассеяния электроны передают им часть своей энергии, изменяя их температуру.

Реликтовые фотоны идут к нам со всех направлений небесной сферы. Поэтому адекватный математический аппарат для анализа углового распределения реликтового излучения — разложение по сферическим функциям или по мультипольным гармоникам. Распределение «амплитуда гармоники — ее номер» образует спектр флуктуаций реликтового излучения. Он определяется спектром возмущений плотности и спектром гравитационных волн, а также перечисленными выше эффектами (Сакса—Вольфа, Силка и Доплера).

Каждый шаг в исследовании реликтового излучения требовал больших усилий экспериментаторов. Однако, необходимо отметить, что каждый шаг приводил к важным физическим открытиям и был важным концептуальным выбором в космологии в целом. Открытие реликтового излучения или наблюдение первой мультипольной гармоники — монопольной — подтвердило теорию горячей Вселенной. Сейчас факт существования

реликтового излучения является одним из решающих аргументов теории Большого Взрыва в целом. Следующий шаг — открытие дипольной гармоник — потребовало увеличения чувствительности радиометров в 1 000 раз! Амплитуда этой гармоник составляет всего 3 *mK*. Ее измерение позволило установить наиболее универсальную систему отчета, определить пекулярные скорости галактик и т. п. Поиск крупномасштабной анизотропии (современное значение амплитуды флуктуаций $\sim 30 \mu K$) вновь потребовал увеличения чувствительности приборов в 100 раз.

Анизотропия реликтового излучения была открыта в 1992 г. Автор книги сам принимал участие в обработке данных, полученных в ходе эксперимента на борту космического аппарата серии «Прогноз». Эксперимент назывался «Реликт» (см. рис. 12.3). На спутнике был установлен радиометр на длину волны 8 мм с рекордной по тому времени чувствительностью по измерению температуры: 35 милликельвин за секунду накопления. Радиометр на одну частоту являлся самым уязвимым местом с точки зрения астрономии. Многочастотный эксперимент позволил бы сразу выяснить природу анизотропии. Эксперимент типа «Реликт» оставлял много места для спекуляций о природе анизотропии. Радиометр представлял из себя две рупорные антенны, угол между которыми составлял 90° , причем диаграмма направленности каждой антенны составляла 5° , и собственно радиометрический тракт. Спутник медленно вращался вокруг своей оси, делая один оборот за две минуты. Один рупор был направлен вдоль оси вращения и все время принимал радиосигнал из одной небесной точки. Он назывался опорным рупором. Второй за две минуты полностью «просматривал» (в астрономии принят термин «сканировал») большой круг небесной сферы. В таком положении спутник находился примерно неделю, успевая просмотреть каждый элемент большого круга несколько тысяч раз. После этого спутник переориентировался и сканировал новый круг на небе. Таким образом была получена карта всего неба на длине волны 8 мм.

Для проведения эксперимента была выбрана высокоапогейная орбита с большой полуосью равной 400 000 км. При этом точка апогея, как легко видеть, находилась дальше орбиты Луны. Сам спутник существовал недолго. Аппаратура

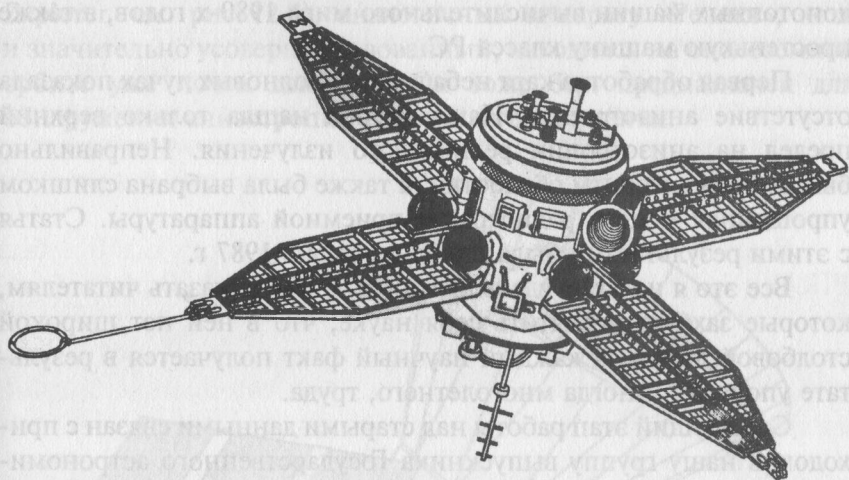


Рис. 12.3. На рисунке показан спутник «Реликт». Он был запущен в космическое пространство в 1984 г. За это время полета космический аппарат успел «осмотреть» все небо, некоторые участки многократно. В результате его работы была получена полная радиокарта неба на частоте 37 ГГц

спутника «Реликт» работала полгода, картографируя небесную сферу. За время работы было получено свыше 10 000 измерений. В 1984 г. аппарат прекратил свое существование, а в 1985 г. по просьбе Я. Б. Зельдовича я подключился к работе по обработке этого эксперимента, которые проводились в Институте Космических Исследований (ИКИ АН СССР) под руководством Игоря Аркадьевича Струкова.

До этого времени космология была практически вне сферы моих научных интересов. Пришлось многое изучать «на ходу». Зато и работа была интересная. Основная задача заключалась в том, чтобы распределить измерения, полученные в виде одномерных массивов чисел, на небесную сферу, выбрать алгоритм обработки данных, моделировать процесс прохождения сигнала через измерительный тракт и т. п. В общем, обычная научная работа.

Процесс компьютерного моделирования тогда занимал много времени. На моделирование одной шумовой карты уходило несколько часов счета. Основная вычислительная техника, доступная нам, представляла из себя ЕС 1045, одну из последних

допотопных машин вычислительного мира 1980-х годов, а также простенькую машину класса РС.

Первая обработка карт неба в микроволновых лучах показала отсутствие анизотропии. Наша группа нашла только верхний предел на анизотропии реликтового излучения. Неправильно был выбран алгоритм обработки, а также была выбрана слишком упрощенная модель радиотракта приемной аппаратуры. Статья с этими результатами была опубликована в 1987 г.

Все это я излагаю здесь для того, чтобы показать читателям, которые захотят посвятить себя науке, что в ней нет широкой столбовой дороги и каждый научный факт получается в результате упорного, иногда многолетнего, труда.

Следующий этап работы над старыми данными связан с приходом в нашу группу выпускника Государственного астрономического института (ГАИШ) МГУ А. А. Брюханова. Его свежий взгляд на проблему позволил существенно улучшить модель тракта и обнаружить анизотропию, «сигнал», как мы тогда говорили. Вскоре после осознания правильной модели радиотракта Андрей Брюханов заявил, что на радиокартах обнаружена анизотропия. После первого сообщения еще целый год мы занимались моделированием, проверяя различные гипотезы о природе «сигнала». Что это? Случайный шум на карте или реальная анизотропия? Окончательно вопрос для нас был решен к концу 1991 г. Это был реальный сигнал. Правда, из-за недостаточной чувствительности надежность обнаружения анизотропии внушала еще некоторые опасения.

В январе 1992 г. на научном семинаре в ГАИШ А. А. Брюханов выступил от лица всей группы (здесь следует упомянуть, что эта группа состояла из руководителя эксперимента И. А. Струкова, Д. П. Скулачева, А. А. Брюханова и автора книги) с сообщением об обнаружении анизотропии. Одновременно была послана статья в научный журнал на русском языке («Письма в Астрономический журнал») и чуть позже в журнал Королевского Астрономического общества (Monthly Notices of Royal Astronomical Society).

К этому времени созданный НАСА космический аппарат «COBE» (аббревиатура английского термина COsmic Background

Explorer, см. рис. 12.4), аналогичный аппарату «Реликт», хотя и значительно усовершенствованный, находился на околоземной орбите уже почти два года. Он тоже был предназначен для обнаружения анизотропии реликтового излучения.

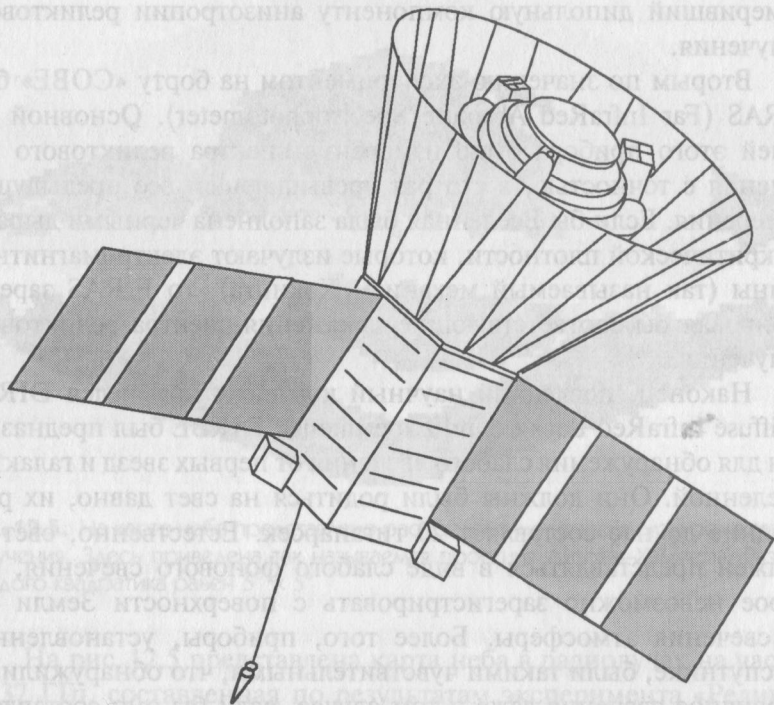


Рис. 12.4. На рисунке изображен космический аппарат «COBE», запущенный НАСА США. В отличие от аппарата «Реликт», спутник «COBE» имел три радиометра на три частоты. Он сканировал небесный свод радиометрами, которые имели угол разнесения 60° . Спутник проработал 4 года, после чего из-за недостатка финансирования его работа была прекращена

В отличие от «Реликта» «COBE» был многочастотным и многоцелевым инструментом. На нем были установлены три основных комплекса аппаратуры. Один комплекс назывался DMR и состоял из нескольких радиометров на три частоты 32 ГГц, 53 ГГц, 90 ГГц. Эта аппаратура предназначалась для обнаружения анизотропии реликтового излучения. Наличие трехчастотного

эксперимента позволяло исследователям с уверенностью отождествить природу анизотропии. Антенны каждого из радиометров обладали полушириной 7° и были раздвинуты на 60° . Это был основной научный комплекс, и руководителем эксперимента был Дж. Смут — известный радиоастроном, впервые правильно измеривший дипольную компоненту анизотропии реликтового излучения.

Вторым по значению экспериментом на борту «COBE» был FIRAS (Far InfraRed Absolute Spectrophotometer). Основной задачей этого прибора было измерение спектра реликтового излучения с точностью, в сто раз превышающей все предыдущие измерения. Если бы Вселенная была заполнена черными дырами до критической плотности, которые излучают электромагнитные волны (так называемый механизм Хокинга), то FIRAS регистрировал бы соответствующие искажения спектра реликтового излучения.

Наконец, последний научный комплекс назывался DIRBE (Diffuse InfraRed Background Experiment). DIRBE был предназначен для обнаружения слабого свечения от первых звезд и галактик Вселенной. Они должны были родиться на свет давно, их расстояние до нас составляет 20 гигапарсек. Естественно, свет их должен представляться в виде слабого фонового свечения, которое невозможно зарегистрировать с поверхности Земли из-за свечения атмосферы. Более того, приборы, установленные на спутнике, были такими чувствительными, что обнаружили бы первичное свечение даже в том случае, если бы оно составляло один процент от зодиакального света!

В конце апреля 1992 г. научный руководитель проекта DMR Дж. Смут на специально созванной пресс-конференции объявил об открытии анизотропии реликтового излучения. Сообщение было распространено по всему свету средствами массовой информации как научная новость номер один. Дж. Смут стал героем дня!

Репортеры посвящали этому событию статьи и с легкой руки одного из репортеров, который объявил, что теперь человечество увидело лик «господа бога», радиокарты «COBE» получили большую популярность, проникнув даже в издания, далекие от науки.

Хочется все-таки заметить, что первым «лик господа бога» увидел выпускник ГАИШ МГУ, наш соотечественник Андрей Брюханов.

Оба спутника могли обнаружить только крупномасштабную анизотропию. Характерный угловой масштаб переменности температуры реликтового излучения составлял десятки градусов.

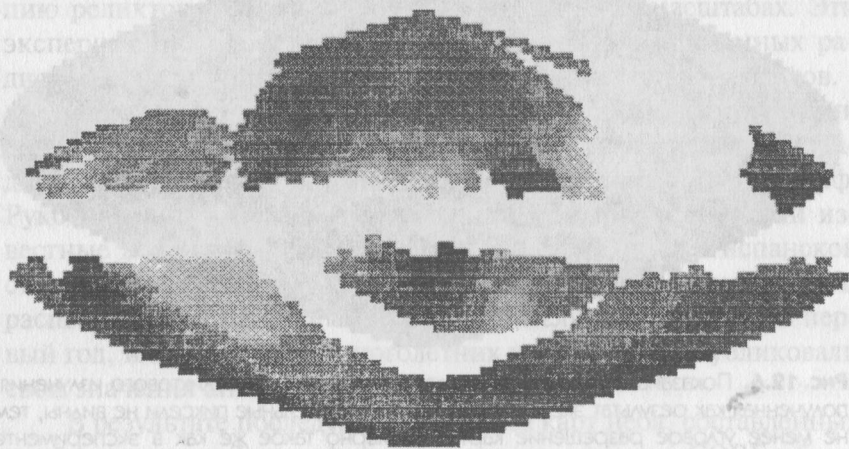


Рис. 12.5. На карте неба представлено распределение температуры реликтового излучения. Здесь приведена так называемая проекция Аитова—Хаммера. Размер каждого квадратики равен $5^\circ \times 5^\circ$

На рис. 12.5 представлена карта неба в радиолучах на частоте 37 ГГц, составленная по результатам эксперимента «Реликт». Многочисленные белые полосы — это так называемые «пораженные» участки неба. В ходе проведения эксперимента в рупор попадало излучение от Луны, Земли (напомним, что эксперимент проводился в космосе), либо от другого известного и мощного источника. Поэтому часть данных пришлось удалить из анализа. Так возникли белые полосы. Толстая белая полоса расположенная на середине карты представляет радиоизлучение галактической плоскости, которое тоже было удалено из анализа. Все эти участки небесной сферы были просто «вырезаны». Различные пиксели (квадратики, размером примерно равные телесному углу диаграммы направленности антенны) покрашены в различные оттенки

серого цвета. Они соответствуют разной температуре реликтового излучения на данном участке неба. Анизотропия реликтового излучения показана здесь разными оттенками серого цвета.

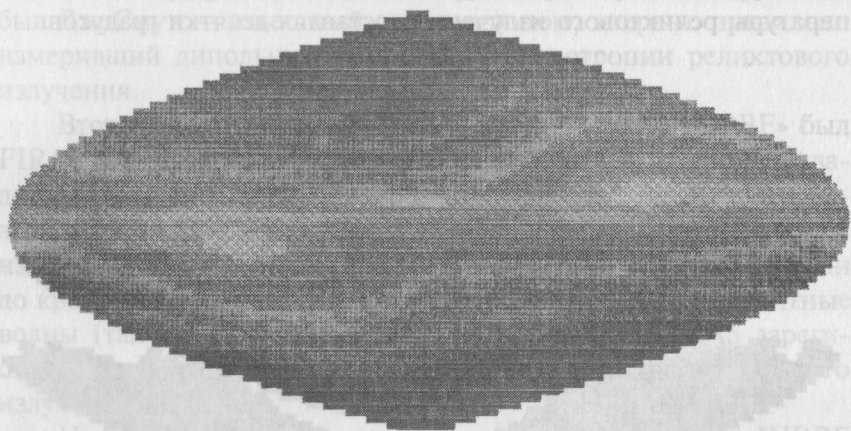


Рис. 12.6. Показана синтезированная карта анизотропии реликтового излучения, полученная как результат эксперимента "COBE". Отдельные пиксели не видны, тем не менее угловое разрешение карты примерно такое же как в эксперименте «Реликт»

На рис. 12.6 приведена синтезированная карта небесной сферы, полученная в ходе проведения эксперимента «COBE». Разная насыщенность пикселей карты вновь соответствует разной температуре реликтового излучения. На этой карте построено распределение анизотропии реликтового излучения, тогда как на карте «Реликт» не проведено разделения излучений различной природы. На карте «Реликт» показана суммарная анизотропия собственно реликтового излучения, синхротронного излучения нашей Галактики, излучения нашей Галактики, получающегося при свободно-свободном рассеянии электронов на протонах, и излучения пыли, которая существует в нашей Галактике. Интенсивность всех трех галактических компонент радиоизлучения зависит от частоты, поэтому в многочастотном эксперименте оказалось возможно провести разделение компонент радиоизлучения различной природы и выделить анизотропию реликтового излучения.

В отличие от репортеров многие специалисты скептически встретили объявления об обнаружении анизотропии.

Тем не менее, сейчас открытие анизотропии считается общепризнанным. Произошло это по нескольким причинам. Главная причина связана с тем, что другие группы экспериментаторов стали объявлять о том, что они тоже обнаружили анизотропию реликтового излучения в средних угловых масштабах. Эти эксперименты проводились радиоастрономами с наземных радиотелескопов и в ходе проведения баллонных экспериментов.

Одно из самых убедительных сообщений об обнаружении анизотропии было сделано специалистами англо-испанской радиоастрономической группы в обсерватории на горе Тенериф. Руководителями эксперимента с английской стороны были известные астрономы Р. Дэвис и Антони Лазенби, а с испанской стороны Рафаэл Реболо. Их аппаратура работала в обсерватории, расположенной на пике Тенериф. Они вели наблюдения не первый год, и как результат многолетних наблюдений опубликовали свои значения анизотропии.

В результате последующего анализа карт неба, составленных в обсерватории Тенериф, и карт эксперимента «COBE» была найдена корреляция между ними. Другими словами, были обнаружены сходные структуры на обеих картах.

Был также проведен эксперимент исследователей из Принстона в Канаде. Он получил название «Саскатун» (по имени города в провинции Саскачеван, в которой проводился эксперимент). В ходе проведения этих наблюдений также была обнаружена анизотропия реликтового излучения.

Кроме того, анализом карт «COBE» занялся известный космолог польского происхождения Крис Горски. Здесь необходимо упомянуть, что польская школа математиков имеет давний и заслуженный авторитет во всем мире. Польские специалисты, как правило, обладают очень высоким уровнем математической подготовки. Крис подключился к обработке данных космического аппарата «COBE» позже других исполнителей. Однако он сумел применить всю мощь современной математики для обработки экспериментальных данных. Мне неоднократно приходилось наблюдать, как на последующих научных конференциях Крис

докладывал результаты обработки. Производили глубокое впечатление тщательность и аккуратность анализа, который был проделан американскими исследователями для получения достоверных данных.

Конечно, отдельные исследователи (среди них есть и крупные международные авторитеты в космологии) сомневаются в открытии анизотропии, но сообщество космологов теперь приняло это открытие.

Современное состояние исследований таково, что позволяет специалистам уверенно говорить об обнаружении анизотропии в крупных и средних угловых масштабах, а также о предварительном измерении амплитуды и положения доплеровского пика.

Сейчас свыше девяти групп наблюдателей опубликовали свои данные по исследованию анизотропии в различных угловых масштабах. Только перечисление литературы (статей, обзоров, докладов на конференциях) занимает целую страницу текста. Тем не менее новые эксперименты по анизотропии очень нужны. Неопределенности отдельных измерений пока еще очень велики, а информация о нашей Вселенной, о физике, которую могут дать эти измерения — бесценна. Кратко эта научная информация будет описана в последующих параграфах.

В 1998 году итальянскими исследователями был блестяще проведен эксперимент по исследованию анизотропии, который назывался «Бумеранг». К моменту, когда дописывается эта книга, полной информации о состоянии обработки эксперимента еще нет. Однако Алессандро Мелхиорри, молодой итальянский исследователь, который является одним из основных «движущих сил» этого эксперимента, сказал мне в телефонном разговоре, что результаты получены превосходные. Подождем их обработки!

Возмущения плотности и гравитационные волны

Наша Вселенная однородна лишь в среднем, в очень больших масштабах $L > 200$ Мпк. По мере уменьшения масштабов мы видим ярко выраженную структуру в виде сверхскоплений и скоплений галактик, самих галактик, шаровых звездных скоплений, а также отдельных звезд и планет. Эта структура возникла

в результате обусловленного гравитационной неустойчивостью роста первоначально малых возмущений плотности. Малый контраст плотности обязан своим происхождением физическим процессам на ранней (инфляционной) стадии развития Вселенной.

Сравнительно недавно было неясно, какие физические процессы могли привести к флуктуациям, существенным на космологических масштабах. Важную роль здесь сыграла теория инфляционной Вселенной. Вакуумные квантовые флуктуации, которые обычно проявляются только в микроскопических масштабах, в экспоненциально расширяющейся Вселенной быстро увеличивают свою длину $\lambda \rightarrow \lambda e^{Ht}$ и амплитуду и становятся космологически значимыми. Поэтому можно сказать, что скопления галактик и сами галактики являются макроскопическими проявлениями квантовых флуктуаций.

Во время стадии инфляции в ранней Вселенной скалярное поле, управляющее инфляцией, «скатывается» из неравновесного состояния в равновесное. Во время этого нестационарного процесса происходит генерация из вакуумных колебаний гравитационного поля как флуктуаций плотности, так и гравитационных волн. Поскольку природа генерируемых полей различна, то и зависимость их амплитуд от параметров и характеристик нестационарного процесса, управляющего инфляцией, также различна. Именно это различие позволяет, зная по отдельности амплитуду скалярного поля и амплитуду гравитационных волн, восстанавливать различные характеристики потенциала скалярного поля, управляющего инфляцией. Другими словами, это позволяет реконструировать физику элементарных частиц в области энергий 10^{16} ГэВ.

Во время инфляции образуется степенной спектр флуктуаций плотности со спектральным индексом, близким к единице. Такой спектр в космологии был предсказан Я. Б. Зельдовичем и называется спектром Зельдовича—Харрисона. Спектр возмущений плотности является степенным, как и спектр гравитационных волн, но отличается от спектра гравитационных волн не только амплитудой, но и спектральным индексом.

Спектр анизотропии (мультипольных гармоник), вызванный возмущениями плотности, существенно отличается от спектра

анизотропии, вызванного гравитационными волнами. Главное отличие заключается в том, что после $l \approx 30$ вклад гравитационных волн в анизотропию подавляется, а вклад возмущений плотности начинает расти из-за эффективного вклада эффекта Силка и эффекта Допплера.

Образуется доплеровский пик, максимум которого лежит при $l \approx 250$, а амплитуда его в несколько раз больше, чем амплитуда плоского спектра. Спектр мультипольных гармоник анизотропии, вызванный возмущениями плотности со спектром Зельдовича—Харрисона, в сравнении с анизотропией, вызванной гравитационными волнами с тем же спектром, изображен на рис. 12.7.



Рис. 12.7. На рисунке представлен теоретический спектр анизотропии реликтового излучения. По горизонтальной оси отложен номер мультиполя, по вертикальной его амплитуда. Отложены два вида спектров. Верхний спектр — анизотропия, возникающая из-за возмущений плотности, нижний — анизотропия, вызываемая гравитационными волнами

Естественно, что наблюдаемый спектр представляет собой сумму двух спектров, так что часть, соответствующая низким гармоникам, при $2 < l < 50$ имеет большую амплитуду гармоник по сравнению со спектром, образованным только возмущениями плотности.

Обратим специально внимание на то, что вклад гравитационных волн в мультипольные гармоники с высокими номерами ($l \gg 30$) ничтожно мал. Значит, для разделения вклада гравитационных волн от вклада возмущений плотности необходимы дополнительные измерения.

Восстановление потенциала инфляции

Метод сравнения амплитуд мультипольных гармоник с низкими l и высокими l был применен к наблюдениям анизотропии в средних масштабах, выполненным на радиоастрономической обсерватории на острове Тенерифе и принстонской группой, антенна которой находилась в канадской провинции Саскачеван. Тщательный анализ, сделанный российско итальянскими исследователями (со стороны Италии в группу входили знаменитый космолог Николо Витторио и Алессандро Мелхиорри), позволил сделать предварительное заключение о существовании гравитационных волн. Сравнение теоретических вычислений и наблюдательных данных показало, что сейчас говорить о положительном вкладе гравитационных волн в анизотропию реликтового излучения можно, хотя вывод нуждается в дополнительной проверке.

Отсюда можно сделать некоторые выводы об эволюции скалярного поля, которое управляет инфляцией и которое описывает физические взаимодействия в энергетическом диапазоне 10^{16} ГэВ. Прежде всего необходимо сказать, что из полученного верхнего предела следует предел на соотношение потенциальной и кинетической энергий скалярного поля во время инфляции. Он выглядит следующим образом. Потенциальная энергия скалярного поля $V(\phi)$ превышает кинетическую энергию скалярного поля $\frac{1}{2}\dot{\phi}^2$ в несколько раз. Это важный вывод. Теперь можно сказать, что гипотеза «медленного скатывания» («slow rolling» в англоязычной литературе) получила экспериментальное подтверждение. Пока это еще не прямые измерения потенциала скалярного поля или (и) его производных. Тем не менее, это первые экспериментальные данные, относящиеся к поведению взаимодействий в области энергий 10^{16} ГэВ.

Значение потенциала при нулевом значении поля $\phi = 0$ не равно нулю: $V_0 > 0$, более того, оно играет роль Λ -члена в ранней Вселенной, величина которого значительно больше современного (на много порядков). Это означает, что в ранней Вселенной должно существовать еще одно скалярное поле, которое прекратило инфляцию. Вывод неожиданный.

Тем не менее, эти выводы нуждаются в дополнительной проверке методами, которые не зависят от начальных предположений. Одним из таких методов является измерение поляризации реликтового излучения.

Поляризация реликтового излучения

Само реликтовое излучение не поляризовано. Поляризация возникает только в том случае, если реликтовое излучение рассеивается на электронах. Рис. 12.8 демонстрирует механизм образования поляризации при рассеянии плоской, произвольно поляризованной волны на одном электроне. Если электромагнитное излучение «светит» на электрон изотропно, то рассеянное излучение неполяризовано. Поэтому для образования частично поляризованного излучения при рассеянии неполяризованного излучения на электронах необходимы три условия:

- 1) анизотропия реликтового излучения на момент образования поляризации;
- 2) достаточно плотная плазма, которая обеспечивает достаточно большое количество индивидуальных актов рассеяния;
- 3) расширение Вселенной и достаточно быстрое понижение плотности свободных электронов для того, чтобы сделать акт вторичного рассеяния (и, следовательно, понижения уровня поляризации) пренебрежимо малым.

Следовательно, поляризация реликтового излучения возникает при рекомбинации, т. е. в эпоху, соответствующую красному смещению $z \approx 1\,000$. В том случае, если во Вселенной был вторичный разогрев вещества в более поздние эпохи, например, из-за распада каких-либо долгоживущих, но нестабильных частиц,

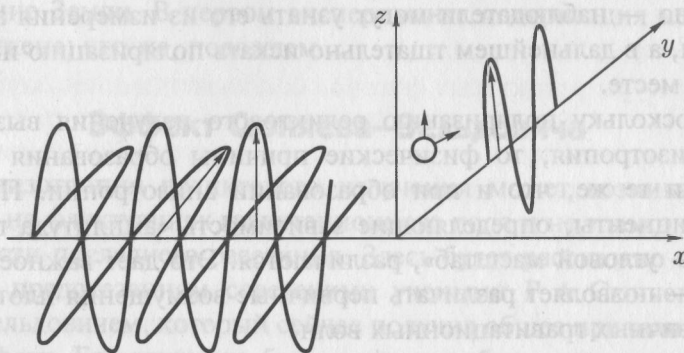


Рис. 12.8. На рисунке изображено образование поляризованной электромагнитной волны при рассеянии неполяризованной волны на электроне. Неполаризованная волна движется вдоль оси Ox , она содержит обе составляющих поля \vec{E}_y и \vec{E}_z , направленные вдоль одноименных осей. Фаза между двумя составляющими — стохастическая величина, что означает отсутствие поляризации волны. Важно заметить, что мгновенные векторы электрического и магнитного полей являются перпендикулярными оси Ox и, следовательно, колеблются только в плоскости Oyz . На плоскости Oyz , т.е. при $x = 0$, помещен электрон e . Он начинает двигаться под воздействием электрического и магнитного полей. Однако его движение происходит в плоскости Oyz . Движущийся электрон излучает электромагнитные волны, которые уже являются рассеянными волнами. Волны, распространяющиеся вдоль оси Oy , являются 100 % поляризованными, поскольку компонента электрического вектора вдоль оси Ox равна нулю, что видно из рисунка. При падении на электрон полностью неполяризованного излучения, рассеянные в направлении оси Oy волны всегда будут иметь выделенную поляризацию

поляризация могла генерироваться и позже. Максимального значения уровень поляризации достигает на угловых масштабах примерно 2° . Этот размер соответствует горизонту частиц в момент рекомбинации. Амплитуда поляризации мала. Среднеквадратичное значение линейной поляризации составляет примерно $1 \mu\text{K}$. Однако, распределение поляризованного излучения по небу с математической точки зрения представляет из себя случайный процесс. В таком процессе могут быть «выбросы» — наблюдатель будет воспринимать их как пятна повышенной и пониженной температуры и уровня поляризации. В этих пятнах максимальное значение уровня поляризации может достигать $3 \mu\text{K}$, что может быть измерено в ближайшем будущем. Измерение поляризации в пятнах хорошо тем, что место расположения пятен

известно — наблюдатели могут узнать его из измерения анизотропии, а в дальнейшем тщательно искать поляризацию именно в этом месте.

Поскольку поляризацию реликтового излучения вызывает его анизотропия, то физические причины образования поляризации те же, что и при образовании анизотропии. Правда, коэффициенты, определяющие зависимость «амплитуда гармоники — угловой масштаб», различаются. Это дает важное следствие — позволяет различать первичные возмущения плотности от первичных гравитационных волн.

Измерение вклада гравитационных волн

Без сомнения, верхний предел, а может быть и обнаружение гравитационных волн, можно будет сделать в ближайшем будущем. Для этого необходимо тщательно измерить спектр анизотропии от гармоники с $l = 2$ до первого и последующих доплеровских пиков включительно. Однако, необходимо отметить, что амплитуда и положение первого доплеровского пика зависят от основных космологических параметров. Неопределенности в величинах этих параметров создают дополнительные трудности обнаружения гравитационных волн.

Однозначным способом обнаружения гравитационных волн остается, без сомнения, измерение поляризации реликтового излучения. Поэтому необходимо увеличивать чувствительность радиометров и приемных систем.

В настоящее время несколько исследовательских групп готовят эксперименты по поиску поляризации реликтового излучения. Одной из групп руководит профессор Дж. Сирони из Миланского университета. На момент написания книги уже достигнута чувствительность радиометров, необходимая для того, чтобы обнаружить поляризацию. Правда, необходимо провести второй эксперимент. Свой первый эксперимент по поиску поляризации реликтового излучения проф. Дж. Сирони проводил на Южном полюсе. Там погодные условия зимой похожи на условия в космосе, кроме того, эксперимент существенным образом использовал

вращение Земли. В первом эксперименте поляризация не была обнаружена; что же, подождем...

Эффект Сюняева—Зельдовича

Анизотропия реликтового излучения может возникать не только на флуктуациях гравитационного поля и не только на поверхности последнего рассеяния. Здесь будет рассказано об эффекте, предсказанном советскими учеными Р. А. Сюняевым и Я. Б. Зельдовичем, который сейчас получил общее признание как SZ-эффект. Его открытие было первым наблюдением анизотропии реликтового излучения, хотя и образующейся «вблизи» нас (по космологическим меркам).

Пространство между поверхностью последнего рассеяния и нами не пустое. В нем встречаются скопления галактик, а в них находится горячий газ. Этот газ обычно нагрет до температуры 10 кэВ. Реликтовые фотоны, проходя через скопление галактик, могут рассеяться на горячих электронах. Рассеяние изменяет энергию фотонов, что эквивалентно изменению температуры фона.

Рассмотрим подробнее этот эффект. Прежде всего здесь следует сказать, что происходит томсоновское рассеяние фотонов на электронах. Это рассеяние характеризуется сечением рассеяния не зависящим от частоты фотона, в отличие от перерасеивания фотона на атоме, например, водорода. При рассеянии фотона меняется не только направление его движения, но и частота. Сечение рассеяния σ_T позволяет вычислить вероятность взаимодействия (в данном случае реликтового фотона с электроном). В астрономии эта величина называется оптической толщей:

$$\tau = \sigma_T n_e l. \quad (12.1)$$

Индекс T означает, что это томсоновское сечение рассеяния, названное так в честь великого английского физика Дж. Дж. Томсона, который открыл электрон. Вероятность является произведением сечения рассеяния, плотности электронов n_e и размера облака электронов l . Для реальных ситуаций наблюдений реликтовых фотонов, прошедших сквозь горячий газ в скоплениях

галактик, величина оптической толщи значительно меньше единицы $\tau \ll 1$. Так что спектр меняется незначительно, изменения температуры реликтовых фотонов составляют несколько милликельвин.

Изменение температуры реликтового излучения происходит при двух условиях. Первое — существование горячих электронов с температурой, сильно отличающейся от температуры реликтового излучения, второе — учет изменения частоты при рассеянии.

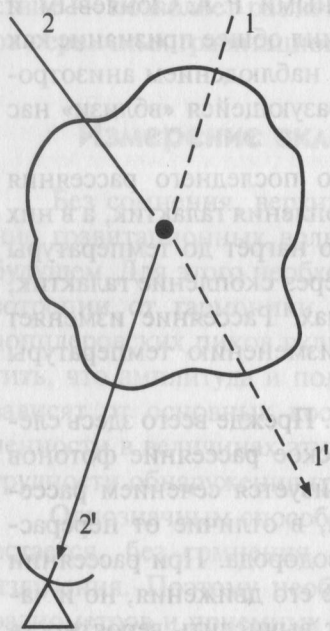


Рис. 12.9. Облако горячих электронов перерассеивает реликтовые фотоны, не изменяя их числа, но изменяя спектр

Пренебрежение изменением частоты приведет к исчезновению эффекта (рис. 12.9). В случае упругого рассеяния, когда можно пренебречь изменением частоты, фотон 1, рассеянный в направлении 1', не достигает наблюдателя, но к наблюдателю приходит фотон 2', рассеянный с направления 2, который «заменяет» потерянный фотон 1. В равновесном случае эта компенсация является точной даже при многократном рассеянии.

При рассеянии на горячих электронах фотоны увеличивают свою частоту пропорционально температуре электронов. Чем больше температура электронного газа, тем заметнее эффект. Посмотрим, как это сказывается на спектре реликтового излучения. Фотон 1 распространяется теперь в новом направлении 1' и не попадает к наблюдателю. Фо-

тон 2, который после рассеяния стал более энергичным и который без рассеяния не попал бы к наблюдателю, после рассеяния попадает к нему. Фотон 1 с меньшей энергией «изымается» из спектра реликтовых фотонов, фотон 2, с энергией, добавленной в результате перерассеивания, «впрыскивается» в спектр. Это приводит к тому, что в рэлей-джинсовской части спектра

количество фотонов уменьшается, а в виновской части спектра — увеличивается. **Внутри** облака горячей плазмы спектр реликтовых фотонов трансформируется.

Яркостная температура реликтового излучения, наблюдаемого сквозь облако горячих электронов, в рэлей-джинсовской части спектра (длина волны $\lambda > 1$ мм) уменьшается (см. рис. 12.10).

Наблюдения, проведенные в субмиллиметровой области длин волн (виновская область спектра), покажут повышение температуры реликтовых фотонов в направлении на то же скопление.

Из этих двух рисунков читатель может сделать вывод, что при наблюдениях на какой-то

длине волны эффект станет нулевым. Действительно, в отличие от эффектов Сакса—Вольфа, Силка и Допплера, эффект Сюняева—Зельдовича является частотно-зависимым. Поток реликтового излучения как функция частоты, на которой ведутся наблюдения, представлен на рис. 12.11.

SZ-эффект был открыт первым среди эффектов, которые создают анизотропию реликтового излучения. Сейчас этот эффект наблюдается на многих скоплениях галактик, с его помощью космологи измеряют параметр Хаббла (привлекая данные рентгеновских наблюдений тех же самых скоплений галактик), параметр плотности и проверяют модели строения скоплений галактик.



Рис. 12.10. Изменение яркостной температуры реликтового излучения в направлении на скопление галактик при наблюдении на сантиметровых и миллиметровых волнах

Перспективы исследований анизотропии

В сообществе космологов существует мнение, что исследования анизотропии могут принести ценную информацию. Поэтому готовятся новые проекты по исследованию анизотропии.

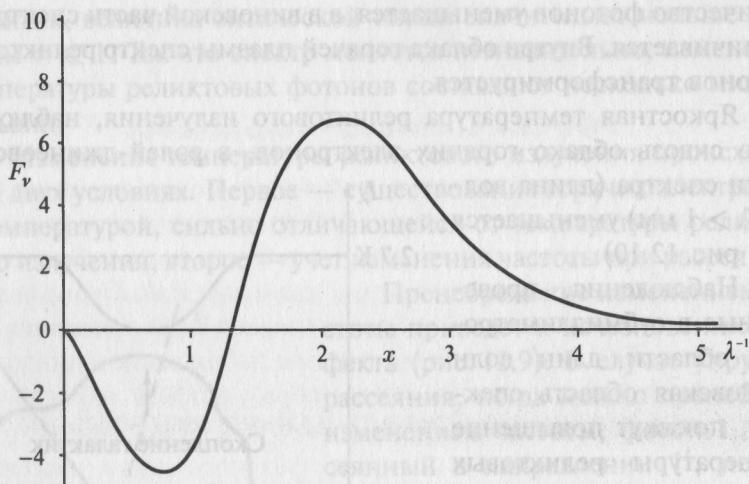


Рис. 12.11. Изменение потока реликтового излучения в направлении на скопление галактик при наблюдении на разных длинах волн. По вертикальной оси отложено значение яркостной температуры, по горизонтальной оси — обратная длина волны, на которой ведутся наблюдения

В НАСА существует проект MAP (Microwave Anisotropy Probe). Это космический проект, предназначенный для исследования анизотропии реликтового излучения. На момент, когда книга готовилась к печати, НАСА запустило MAP. Руководителем проекта является Норман Яросик.

Объединенная Европа подготовила свой космический проект. Сейчас он называется «ПЛАНК» в честь знаменитого физика, открывшего квантовую механику. У проекта долгая история. Вначале существовали два независимых научных предложения. Один назывался COBRAS, второй — SAMBA. Первый был предложен знаменитым итальянским космологом и радиоастрономом Рено Мандолези. Он предназначался для исследования анизотропии реликтового излучения в нескольких диапазонах радиоволн. Из-за экономии научный комитет ЕКА (европейский аналог НАСА) предложил исследователям объединить оба проекта на одной полетной платформе. Две группы согласились, выработали единое предложение, и проект получил название COBRAS/SAMBA.

Проект не раз пересматривался, каждый раз ЕСА собирало представительные научные конференции (несколько раз в достаточно экзотических местах, например, на горном курорте в Альпах, в деревушке с названием Лез Арк), на эти конференции приглашались ведущие космологи из всех стран. Специалисты выступали с докладами по их работам, но одновременно велось обсуждение будущих проектов. Обсуждение велось в формальной обстановке, во время докладов, в неформальной обстановке, в кулуарах, во время обедов, на прогулках. От такого обсуждения проект только выиграл. В начале 1997 г. проект был переименован и назван «ПЛАНК» (см. рис. 12.12). В том же году финансирование исследований, связанных с ним, резко возросло. Аппарат был поставлен в очередь на запуск в 2004 году. Сейчас он является одним из самых многообещающих космических проектов, хотя расписание запуска существенно сдвинулось.

Кратко перечислим возможности, которые предоставляет космологии запуск аппарата «ПЛАНК». Спутник будет нести на себе два набора радиоизмерительных приборов. Один набор будет составлен из 4 радиометров и предназначен для обзора неба на частотах от 30 ГГц до 100 ГГц, это так называемый «инструмент низких частот»; второй набор будет состоять из 6 болометров, он называется «инструмент высоких частот» и предназначен для построения карты неба на частотах от 100 ГГц до 857 ГГц. Болометры в отличие от радиометров являются широкополосными приборами. Чувствительность по измерению температуры каждого прибора будет составлять несколько микрокельвин. Угловое разрешение приборов будет составлять десяток угловых минут (сравните с угловым разрешением «Реликта» и «COBE» $\sim 6^\circ$).

«ПЛАНК» будет способен точно измерить спектр флуктуаций реликтового излучения. Точность каждой гармоники будет ограничена лишь естественными неопределенностями, связанными с тем, что Вселенная предоставлена нам для наблюдений только в одном экземпляре и случайное поле вариаций плотности и гравитационных волн тоже только одно. Такая точность измерения углового спектра анизотропии позволит измерить параметр Хаббла, например, с точностью $\sim \pm 5$ км/с/Мпк, параметр плотности Ω с точностью несколько процентов, спектральный индекс

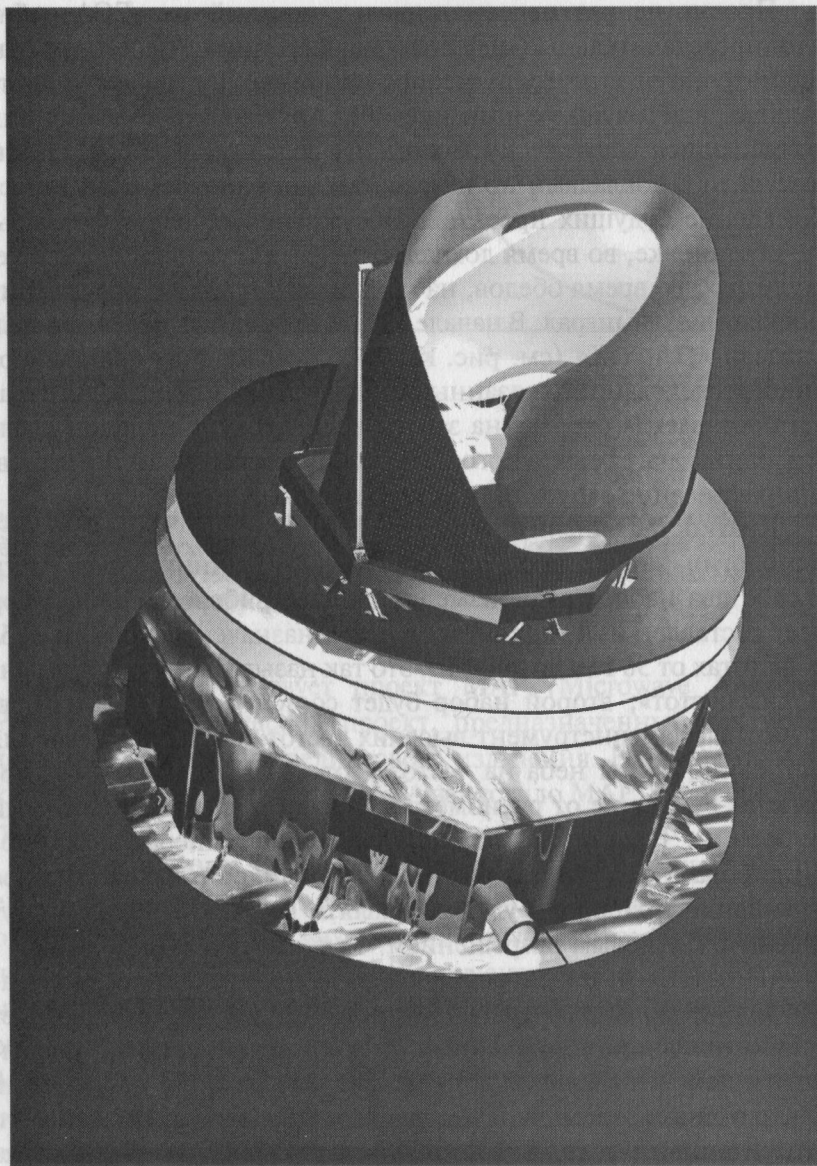


Рис. 12.12. Космический аппарат, предназначенный для исследования анизотропии реликтового излучения и названный «ПЛАНК» в честь знаменитого немецкого ученого

будет определен с точностью лучше, чем один процент! Можно будет, наконец, точно измерить полное количество барионов во Вселенной и определить, есть ли во Вселенной достаточно интенсивный фон гравитационных волн.

Сейчас ЕСА тщательно подготавливают спутник к выполнению миссии, запуск назначен на 2007 г. Количество информации, которое будет получено в ходе проведения эксперимента, составляет поистине астрономическое число — $\sim 10^{18}$ бит.

Гонка, открытая первыми наблюдениями анизотропии реликтового излучения, набирает темп. Возможно, среди читателей найдутся молодые люди, которые захотят участвовать в ней. Время для того, чтобы присоединиться к участию в этих исследованиях, еще есть.

Крупномасштабная структура Вселенной

Распределение галактик в крупных масштабах

Наша Вселенная однородна в среднем, в больших масштабах, превышающих 200 Мпк. По мере уменьшения масштабов начинает проявляться ярко выраженная структура. Вначале появляются сверхскопления галактик с масштабом $L \sim 100$ Мпк, образующие относительно тонкие стенки или, как чаще их называют, «блины» с поперечным размером $L \sim 10-20$ Мпк. Далее начинают вырисовываться скопления галактик $L \sim 10$ Мпк, а также сами галактики. Размеры галактик лежат в больших пределах, самые маленькие (карликовые) галактики имеют размер меньше 10 кпк, а массу порядка $10^8 M_{\odot}$. Размеры самых крупных галактик достигают сотен килопарсек, а их массы достигают значений вплоть до $10^{13} M_{\odot}$. Внутри галактик материя тоже распределена в виде ярко выраженной структуры: галактические рукава в спиральных галактиках, шаровые звездные скопления $L \sim 1$ пк, отдельные звезды и, наконец, планеты.

В задачу космологии входит лишь описание крупномасштабной структуры Вселенной, т. е. объектов с размерами 10 Мпк и больше. К ним принадлежат скопления и сверхскопления галактик.

Как полагают, эта иерархическая структура Вселенной возникла в результате обусловленного гравитационной неустойчивостью роста первоначально малых возмущений плотности. Вопрос о происхождении этих малых возмущений рассмотрен нами ранее в других главах. Здесь напомним только, что они обязаны

своим происхождением физическим процессам на ранней (инфляционной) стадии эволюции Вселенной. Поэтому их величина и характерные размеры определяются фундаментальными характеристиками физики микромира.

Начальная стадия роста возмущений плотности

Наполняющая раннюю Вселенную высокотемпературная плазма состоит из электронов, протонов, небольшой примеси нейтронов, фотонов, и, как выяснено в последние годы, из скрытого вещества. Физический состав скрытой массы Вселенной пока неизвестен, хотя наиболее вероятным кандидатом на роль скрытой массы является так называемая холодная скрытая масса, состоящая, например, из аксионов (гипотетических элементарных частиц, которые предсказаны физиками-теоретиками; они являются необходимым элементом при объяснении сохранения четности в ядерных взаимодействиях, но до сих пор не обнаружены в эксперименте) или нейтралино — суперпартнере нейтрино. Естественно, что эволюция возмущений в многокомпонентной плазме описывается сложной системой дифференциальных (а точнее, и интегро-дифференциальных) уравнений. Не имея возможности подробно рассмотреть эту проблему, ограничимся описанием самых существенных моментов современных представлений о росте возмущений плотности в нашей Вселенной.

Непосредственно после стадии инфляции вещество во Вселенной представляло из себя высокотемпературную плазму с радиационно-доминированным уравнением состояния. Возмущения плотности, длина которых была больше размеров горизонта, являются «вмороженными», их рост не сопровождается значительным усилением контраста плотности. Однако горизонт частиц во Вселенной растет быстрее, чем растет физическая длина волны возмущения плотности. Поэтому в некоторый момент любая волна становится равной размеру горизонта частиц. Как говорят, волна «выходит» из-под горизонта. Начиная с этого момента, волна возмущения плотности представляет из себя звуковую волну на расширяющемся фоне. В многокомпонентной релятивистской плазме действует много высокоэффективных

механизмов, подавляющих волновые движения. Самый эффективный механизм в космологии — это затухание Силка.

Действие этого механизма приводит к тому, что звуковые возмущения затухают. Так продолжается до тех пор, пока один из компонентов плазмы не становится «холодным». К этому моменту скорости частиц становятся нерелятивистскими, механизмы затухания практически перестают действовать и тогда начинается рост первичных возмущений плотности, вызванный гравитационной нестабильностью в веществе.

Вселенная заполнена, в основном, невидимой темной материей. Эта материя становится нерелятивистской значительно раньше, чем происходит рекомбинация водорода, значительно раньше, чем начинается рост возмущений плотности в барионном компоненте вещества.

Считается, что такой момент находится в промежутке красных смещений $z = 10^5 - 10^3$. Возмущения в невидимом компоненте вещества начинают расти с $z = 10^5$. В обычном веществе, состоящем из протонов и электронов, продолжает действовать механизм затухания возмущений, поэтому они не растут. Возмущения в обычном веществе начинают расти после рекомбинации: т. е. после $z = 1000$. К этому моменту возмущения в невидимом веществе успели вырасти в ~ 100 раз и обычное вещество «падает» в уже существующие потенциальные «ямы». Рост возмущений в обычном веществе быстро догоняет рост возмущений в невидимом и далее они растут с одинаковым темпом.

Теория эволюции возмущений плотности была создана Джинсом, а релятивистская теория развития возмущений в нестационарном мире расширяющейся Вселенной была развита советским ученым Е. М. Лифшицем в 1946 г. Качественные результаты этой теории, однако, можно понять в рамках ньютоновой гравитации на расширяющемся фоне.

Физической причиной роста возмущений плотности является гравитационное притяжение. Рассмотрим ситуацию, когда на фоне однородно распределенного вещества с плотностью ρ_0 в начальный момент времени возникает область повышенной плотности с избытком $\delta\rho$. Очевидно, что она будет притягивать к себе окружающее вещество. Вещество начинает скапливаться

в этой области, если этому процессу не препятствуют силы давления. В том случае, когда в веществе при нарушении однородности развиваются силы притяжения, то вещество будет накапливаться до тех пор, пока его не уравновесят силы давления. В случае, когда размер области L с избытком вещества велик, будут доминировать гравитационные силы. В областях повышенной плотности с малыми размерами доминирующими являются силы давления, которые выравнивают контраст плотности.

Легко понять, что по порядку величины границе раздела между двумя этими возможностями соответствует равенство времени падения к центру выделенной области t_g из-за сил притяжения и времени распространения звуковой волны t_s , которое обуславливает силы давления, противодействующие силам притяжения. Граничный масштаб, который получается из равенства этих промежутков времени, называют длиной Джинса (который в начале нашего века исследовал задачу о гравитационной неустойчивости в рамках ньютоновой теории на стационарном фоне). Чаше ее обозначают λ_J . Точное значение длины Джинса в расширяющейся Вселенной, заполненной многокомпонентной жидкостью, не входит в круг задач, которые мы здесь обсуждаем. Вывод этой формулы читатель может найти в специальной литературе [5].

Возмущения плотности на стационарном фоне растут экспоненциально. Интуитивно ясно, что на расширяющемся фоне рост возмущений замедлится. Ведь в расширяющейся Вселенной фоновая плотность $\rho_0(t)$ является убывающей функцией времени. Скорость развития возмущения в расширяющейся Вселенной будет степенным образом зависеть от времени.

Итак, вместо экспоненциального получается степенной закон. Рост возмущений плотности в расширяющейся Вселенной значительно медленнее, чем рост возмущений плотности в стационарном веществе; для образования крупномасштабной структуры Вселенной и галактик требуется очень много времени.

Нелинейная стадия развития возмущений

Нелинейная стадия развития неоднородностей в космологии существенно отличается от эволюции, например, протозвездного

облака. Несмотря на то, что доминирующий физический механизм в обоих случаях одинаков — гравитационное притяжение, — существует принципиальное различие. Оно заключается в том, что образование крупномасштабной структуры происходит в бесстолкновительном веществе, частицы которого движутся, практически не взаимодействуя друг с другом. Единственная сила взаимодействия, вызывающая рост возмущений — гравитационное взаимодействие. Для точного описания такого взаимодействия необходимо решать кинетические уравнения (по крайней мере в некотором приближении к реальной ситуации, а лучше — задачу N тел в гравитационной физике). Хотя данное рассмотрение выходит за рамки книги, основные идеи, лежащие в фундаменте теории можно понять из простых физических рассуждений.

Вначале рассмотрим одномерное движение по инерции частиц, которые в начальный момент времени расположены равномерно. Будем считать, что частицы непрерывной среды пронумерованы координатами Лагранжа ξ , а физические координаты частиц будем обозначать координатами Эйлера x . В начальный момент времени t_0 координаты, нумерующие частицы и физические координаты x , совпадают, а в последующие моменты времени между ними существует зависимость:

$$x = \xi + v(\xi)(t - t_0). \quad (13.1)$$

Здесь $v(\xi)$ — скорость частицы с лагранжевой координатой ξ . Рост координаты пропорционально времени означает, что мы рассматриваем инерциальное движение, а зависимость скорости частицы от ее лагранжевой координаты означает, что частицы движутся с разными скоростями. В этом случае, две частицы с различными скоростями спустя некоторое время могут оказаться в одной точке пространства или даже одна из них обгонит другую. Образуется, как говорят математики, занимающиеся теорией катастроф, складка или переклест.

Рассмотрим, что происходит с плотностью среды при таком процессе. Здесь мы рассматриваем одномерный процесс, поэтому плотность в нашем случае — одномерная плотность. Поскольку считается, что частицы невзаимодействующие, то можно

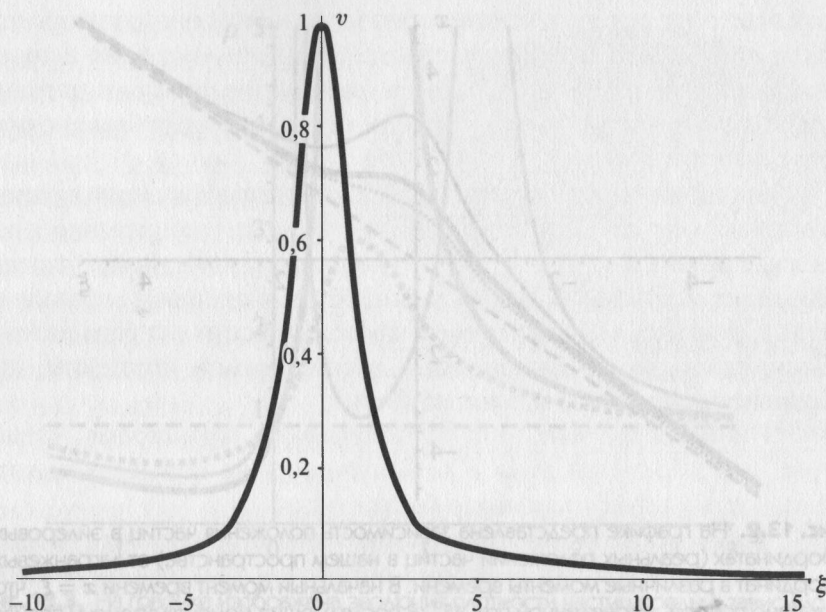


Рис. 13.1. На графике представлено начальное распределение скоростей частиц на прямой. Скорость $v(\xi)$ в зависимости от лагранжевой координаты ξ представляет функцию с максимумом в центре и спадающими крыльями по бокам. Это значит, что частица, расположенная при $\xi = 0$, имеет максимальную скорость, направленную в сторону возрастающих ξ . Частицы, которые расположены правее, имеют меньшие скорости. Следовательно, нулевая частица их догонит

написать закон сохранения массы, а плотность будем определять как сумму масс, деленную на физическое расстояние Δx между частицами. Закон сохранения массы означает, что количество частиц остается постоянным, они не рождаются и не исчезают.

Плотность в лагранжевых координатах не зависит от времени, а эволюция плотности в эйлеровых (физических) координатах зависит от начального распределения частиц в ξ -пространстве и начального распределения скоростей $v(\xi)$. На рис. 13.1 показано начальное распределение скоростей частиц $v(\xi)$, в зависимости от лагранжевой координаты ξ .

В начальный момент времени $t = t_0$ распределение частиц в лагранжевых координатах и в физическом пространстве

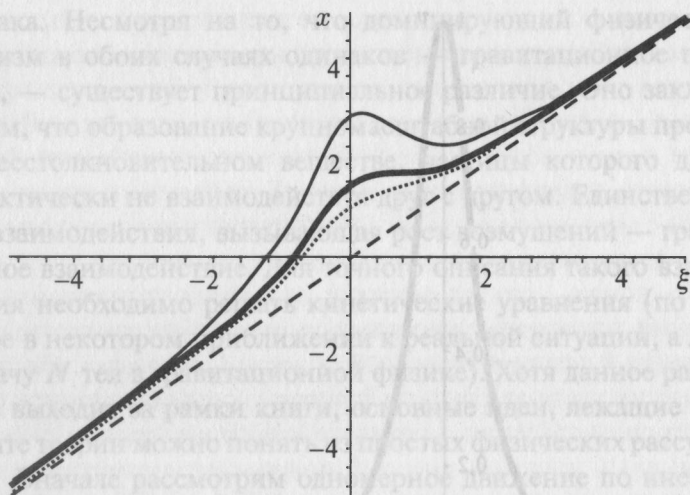


Рис. 13.2. На графике представлена зависимость положения частиц в эйлеровых координатах (реальных положений частиц в нашем пространстве) от лагранжевых координат в различные моменты времени. В начальный момент времени $x = \xi$, что показано прямой, проведенной под 45° . В последующие моменты времени прямая начинает искривляться. Ее правое крыло становится все более пологим, а угол между касательной к этому крылу и горизонтальной осью уменьшается. Жирная кривая показывает первый момент, когда касательная становится параллельной горизонтальной прямой, когда возникает катастрофа. В последующие моменты времени кривая изгибается еще больше, каждой точке по оси x соответствует три точки по оси ξ .

совпадает. Однако уже в последующие моменты времени распределение частиц начнет меняться. На рис. 13.2 показаны изменения в распределении частиц в различные моменты времени после начала движения. Наступает момент времени, когда одна из частиц догоняет частицу, которая движется впереди. Физическое расстояние между ними становится равным нулю, а значит, плотность числа частиц на прямой обращается в бесконечность. Этот момент соответствует началу развития катастрофы (математической)¹⁾. Образуется складка или перехлест. Этот момент выделен. Кривая, соответствующая распределению частиц,

¹⁾ Правда, в случае движения машин (а не частиц) по трассе этот момент соответствует, конечно, реальной катастрофе.

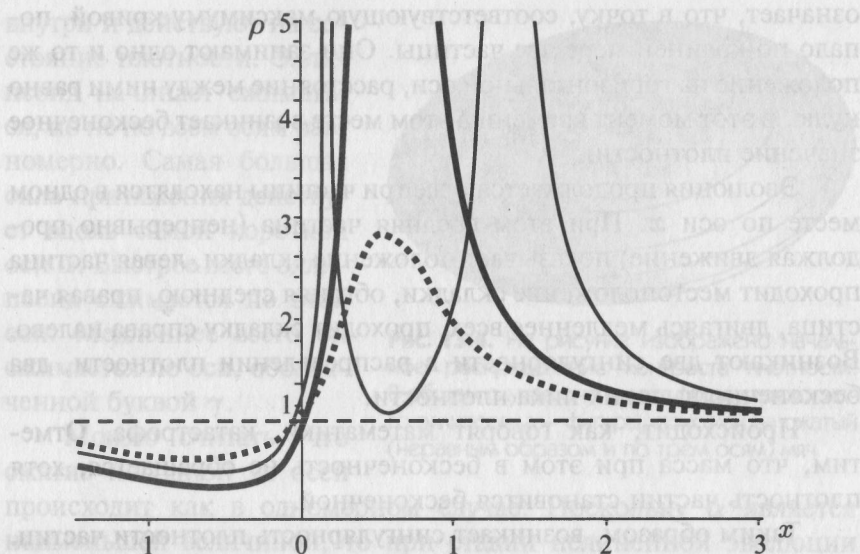


Рис. 13.3. На графике изображена эволюция плотности частиц среды в зависимости от значения их координаты x в разные моменты времени. Вначале плотность равномерна, что показано прямой, параллельной горизонтальной оси (соответствующей значению $\rho = 1$). В следующие моменты времени плотность начинает уменьшаться слева от оси ординат и увеличиваться справа. Максимум функции, который расположен справа от оси ординат, растет. Наступает момент, соответствующий образованию складки, когда этот максимум становится бесконечным. На рисунке он выделен жирной линией. В последующие моменты времени образуются две сингулярности — бесконечные максимумы плотности возникают в двух местах

показана на графике самой жирной линией. Касательная к этой кривой становится параллельной горизонтальной оси. Возникает неоднозначность в функции $x(\xi)$. Две частицы, помеченные разными координатами ξ , имеют одно значение x .

За образованием и эволюцией складки легко проследить, наблюдая как меняется плотность частиц среды $\rho(x)$ в зависимости от физической координаты x (рис. 13.3). Изобразим на графике эволюцию распределения частиц. Рассмотрим эволюцию плотности для нескольких выделенных моментов времени. Кривая, изображенная тонкой линией, совпадает с начальным распределением частиц и взята в начальный момент времени. Жирная кривая соответствует моменту времени образования складки. Это

означает, что в точку, соответствующую максимуму кривой, попало по крайней мере две частицы. Они занимают одно и то же положение на горизонтальной оси, расстояние между ними равно нулю, в этот момент времени в этом месте возникает бесконечное значение плотности.

Эволюция продолжается, уже три частицы находятся в одном месте по оси x . При этом средняя частица (непрерывно продолжая движение) показывает положение складки, левая частица проходит местоположение складки, обгоняя среднюю, правая частица, двигаясь медленнее всех, проходит складку справа налево. Возникают две сингулярности в распределении плотности, два бесконечно высоких пика плотности.

Происходит, как говорят математики, катастрофа. Отметим, что масса при этом в бесконечность не обращается, хотя плотность частиц становится бесконечной.

Таким образом, возникает сингулярность плотности частиц.

Почему мы столь подробно обсуждаем казалось бы очевидные вещи? Тридцать лет назад, когда Я. Б. Зельдович приступил к созданию теории крупномасштабной структуры Вселенной, эти соображения не казались очевидными. Скорее наоборот, они казались неприменимыми к развитию структуры во Вселенной. Более того, даже сам автор этой теории, академик Я. Б. Зельдович вначале называл ее теорией образования галактик. Он, Андрей Георгиевич Дорошкевич и их сотрудники сначала думали построить теорию образования галактик во Вселенной.

При трехмерном движении усложняется его описание при сохранении качественной структуры. Теперь движение частиц определяется не скалярной величиной x , а векторной величиной \vec{r} .

Пусть начальное распределение плотности имеет контраст значительно меньше единицы. Пусть трехмерный профиль плотности представляет из себя трехосный эллипсоид, изображенный на рис. 13.4.

Обозначим оси этого эллипсоида. Самую короткую ось обозначим буквой α , среднюю ось — буквой β , самую длинную — буквой γ . Эта фигура не обладает свойством сферической симметрии, поэтому внешние слои вещества создают поле притяжения

внутри и действуют на состояние плотности. Эллипсоид начинает сжиматься, но не по всем осям равномерно. Самая большая сила притяжения действует вдоль самой короткой оси α . Быстрее всего эллипсоид сжимается по этой оси. Медленнее всего он сжимается по оси, обозначенной буквой γ .

Можно считать, что сжатие по одной из осей происходит как в одномерном случае. Поскольку α является наименьшей величиной, то при стадии нелинейной эволюции вначале возникает бесконечность плотности по этой оси, а затем уже бесконечности по двум другим осям. Поскольку величины α , β , γ , вообще говоря, различны (даже в поле случайных возмущений неравенство этих величин — так называемый случай общего положения), то сжатие идет вдоль одной из осей и вначале формируется тонкий слой с высокой плотностью. Затем сжатие идет вдоль одной из перпендикулярных осей и образуется структура, подобная нити, после чего сжатие идет по третьей из осей и образуется комок вещества высокой плотности и нерегулярной формы. Однако этот процесс достаточно длительный. Тонкий (по космологическим масштабам) слой вещества получил название «блин». Такие «блины» были открыты при составлении каталогов галактик.

До сих пор мы рассматривали движение по инерции. Как изменятся результаты, если мы «включим» воздействие гравитационного поля? Изменится лишь зависимость роста контраста плотности от времени, а вся картина в целом останется справедливой.

До образования «блинов» плотность остается достаточно малой, среду частиц можно считать бесстолкновительной. После образований «блинов», когда контраст плотности значительно

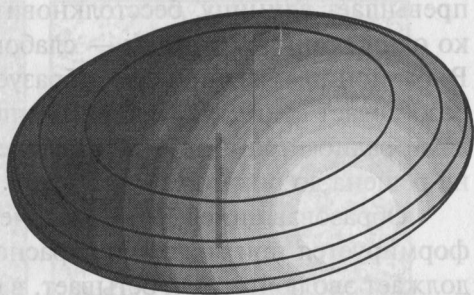


Рис. 13.4. На рисунке изображено начальное распределение контраста плотности. В общем случае оно имеет форму трехосного эллипсоида — фигуры, похожей на сжатый (неравным образом и по трем осям) мяч

превышает единицу, бесстолкновительной можно считать только один компонент среды — слабовзаимодействующие частицы. В барионном компоненте образуется ударная волна, которая разогревает вещество и, в принципе, может быть замечена методами радиоастрономии. Эта интересная астрономическая задача не решена до сих пор.

Образовавшийся блин горячего вещества (он полностью формируется при значениях красного смещения $z \sim 10-4$) продолжает эволюцию. Он остывает, в нем начинают формироваться мелкомасштабные процессы скучивания, вещество разбивается на гигантские облака, из которых уже формируются галактики. Надо подчеркнуть, что процесс образования галактик пока непонятен даже на качественном уровне; может быть, некоторые из юных читателей этой книги смогут разгадать загадку образования мира галактик, кто знает...

Несмотря на то, что крупномасштабная структура в распределении галактик в пространстве уже обнаружена, следует подчеркнуть, что сама структура является лишь переходным состоянием. Структура в виде блина продолжает сжиматься по второй оси и со временем превратится в нить (конечно, состоящую из галактик), которая будет продолжать сжатие по третьей оси, пока этот процесс не завершится образованием комковатой структуры сверхскопления галактик.

Анализ процессов образования крупномасштабной структуры галактик даже качественными методами является очень сложным, поэтому специалисты, в основном, предпочитают производить компьютерное моделирование процессов образования крупномасштабной структуры из начальных малых возмущений с учетом многокомпонентной среды. Следует сказать, что такое компьютерное моделирование стало возможным в последние 10 лет, когда появились быстродействующие ЭВМ.

На рис. 13.5 показано двумерное компьютерное моделирование эволюции крупномасштабной структуры Вселенной. При вычислениях считалось, что Вселенная заполнена темной материей, представляющей из себя нейтрино с ненулевой массой покоя. Из первоначально малых возмущений плотности (рис. 13.5 а) возникает повышенный контраст плотности (рис. 13.5 б), который

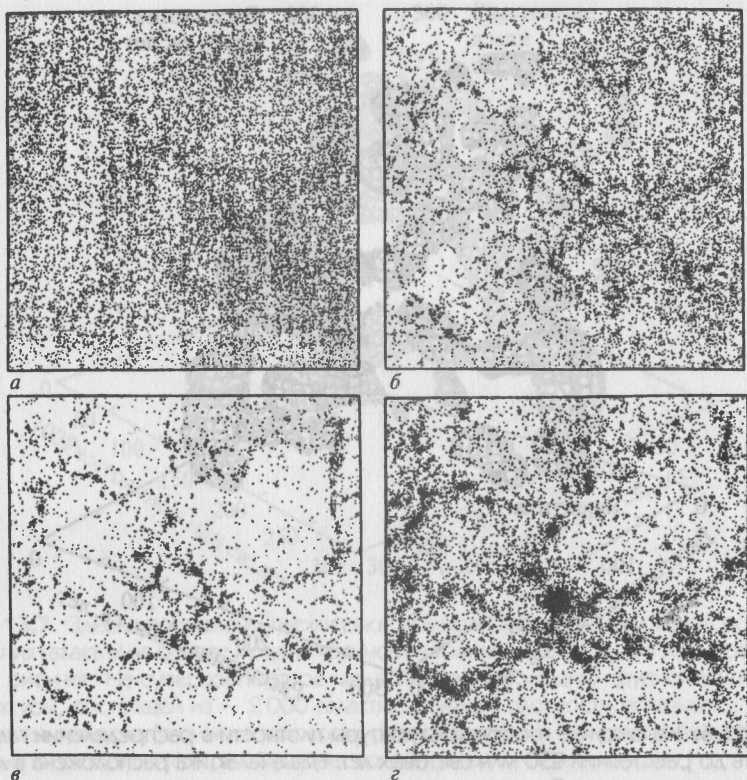


Рис. 13.5. На рисунке изображено компьютерное моделирование двумерного распределения пробных точек, изображающих галактики. Компьютерное моделирование проделано Джорджем Эфстафио. Рисунок, обозначенный буквой «а», представляет начальное распределение точек в пространстве. Точки распределены неравномерно, поэтому существует случайное двумерное распределение скоростей и двумерный контраст плотности. На второй картинке «б» показано 2D распределение галактик после 5 млрд лет эволюции. Наконец, на последних картинках показано распределение галактик после 10 и более миллиардов лет эволюции крупномасштабной структуры. Явно видны двумерные «блины»

затем (рис. 13.5 в, г) трансформируется в ярко выраженную структуру, содержащую двумерные «блины».

На рис. 13.6, 13.7, показаны контуры плотности распределения галактик в окружающем нас пространстве, и контуры плотности модельного распределения, найденные по теории Зельдовича.

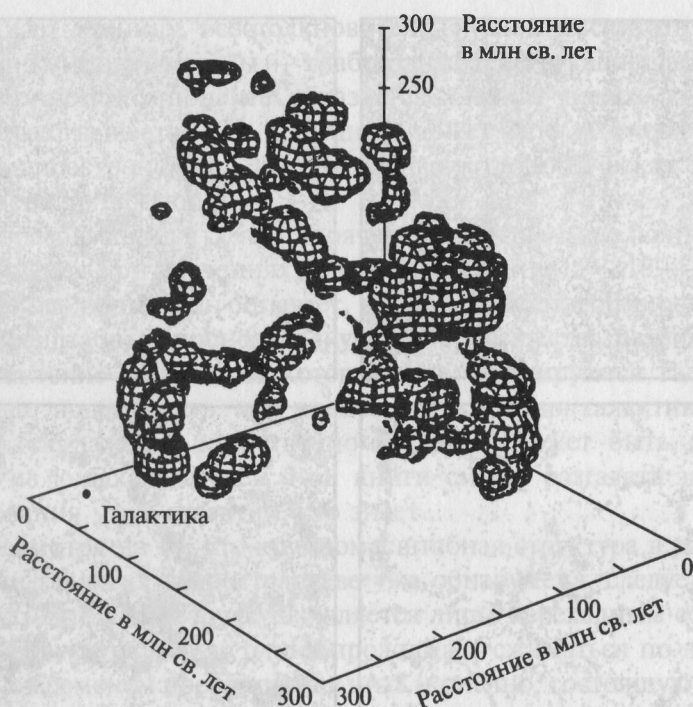


Рис. 13.6. На рисунке изображены контуры плотности в распределении галактик вплоть до расстояний 250 млн световых лет. Наша Галактика расположена в левом нижнем углу рисунка. В распределении вещества явно прослеживается структура в виде цепочек галактик, отдельных «блинов» и войдов

На рис. 13.8 показано распределение галактик в окружающем нас пространстве. Хочется подчеркнуть, что сходство первых двух картинок изумительное. Не только наглядное сходство, но и строгие математические критерии показывают, что эта картина в общих чертах соответствует астрономическим наблюдениям.

Большой Аттрактор

Еще об одном явлении необходимо упомянуть. Это Большой Аттрактор. Теория крупномасштабной структуры Вселенной не объясняет его существования. Более того, само существование этого объекта долго подвергалось сомнению.

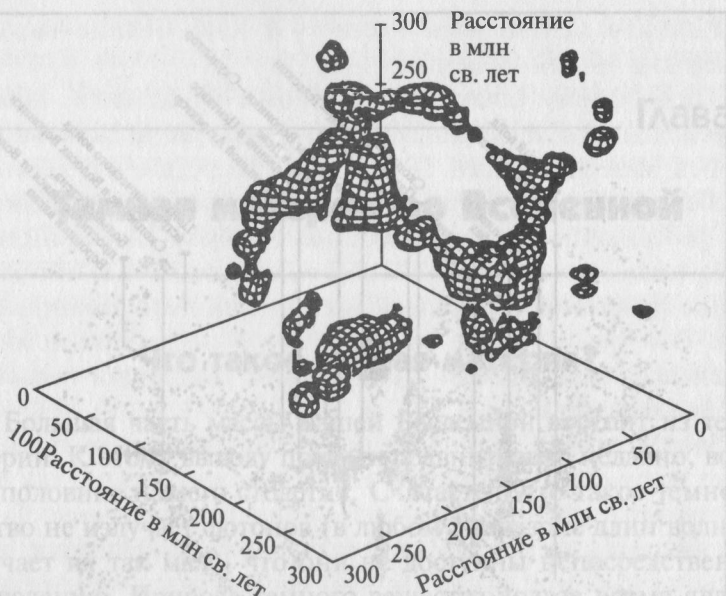


Рис. 13.7. Здесь изображено трехмерное компьютерное моделирование распределения галактик на основе модели «блинов» в том же масштабе, что и на предыдущем рисунке. На суперкомпьютере моделировали эволюцию крупномасштабной структуры, состоящей из $\sim 2\,000$ галактик. Контуры плотности показывают очень хорошее согласие (в смысле топологии распределения и его основных математических характеристик) с реальным распределением галактик на небе

В 1986 г. астрономы, измеряющие скорости галактик, обнаружили, что усредненная скорость галактик направлена в сторону сверхскопления Гидра—Центавра. Эта скорость значительно превосходит усредненную скорость, следующую из закона Хаббла. Одно из возможных объяснений такого распределения скоростей — наличие большого скопления вещества, которое притягивает все галактики в своей окрестности. Масса этого скопления должна быть чудовищной — в десятки тысяч раз превосходить массу нашей Галактики.

Однако увидеть этот объект было очень трудно. Он находился в направлении скопления Центавра, т. е. был закрыт от астрономов центром нашей Галактики. В ней, особенно в центральной области, много пыли, которая экранирует излучение. Другими

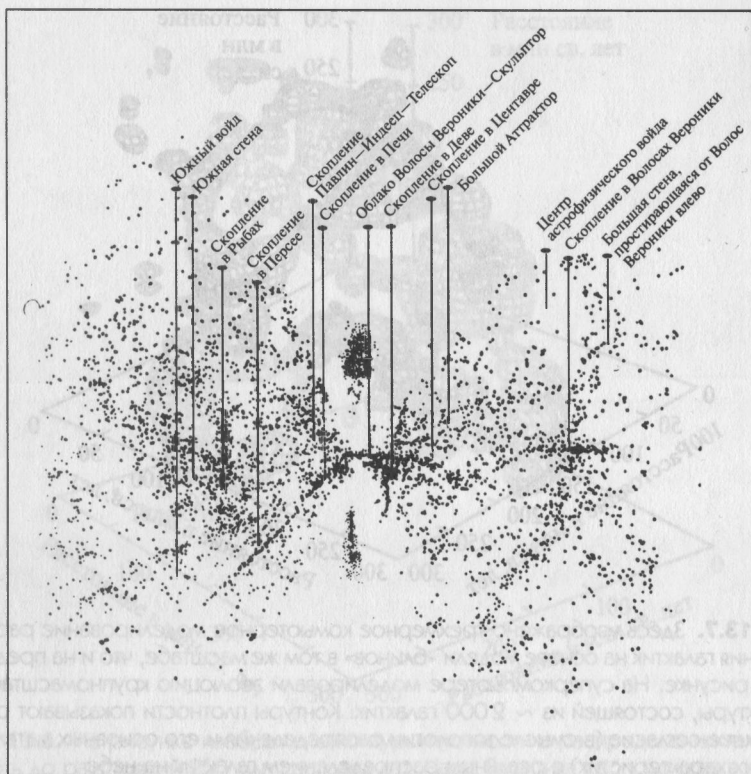


Рис. 13.8. Распределение галактик на северном и южном небе. Глубина распределения примерно такая же, как и на рис. 2.3. Явно прослеживаются несколько войдов, цепочки галактик и «блины»

словами, свет от Большого Аттрактора поглощался по пути. Только мощные современные телескопы позволили «приоткрыть» пылевую завесу, компьютеры помогли сформировать изображение из ничтожно слабого потока света и астрономы смогли увидеть Большой Аттрактор. По оценкам, он имеет диаметр примерно сто мегапарсек, а его центр удален от нас на расстояние пятьдесят мегапарсек. Другими словами, наша Галактика принадлежит одному из самых больших скоплений во Вселенной!

Темная материя во Вселенной

Что такое темная материя?

Большая часть массы нашей Вселенной состоит из темной материи. К этому выводу пришли сравнительно недавно, во второй половине нашего столетия. Считается, что такое темное вещество не излучает фотонов (в любом диапазоне длин волн) или излучает их так мало, что они не доступны непосредственному наблюдению. Природа темного вещества долгое время является предметом дискуссий.

Впервые о существовании темной материи ученые заподозрили по кривой вращения нашей Галактики, а также по кривым вращения других галактик. Позже ее существование было подтверждено наблюдениями скоростей отдельных галактик в скоплениях галактик, а также по температуре горячего газа в этих скоплениях. Доля светящейся материи (звезд, газа и пыли) в общей массе нашей Вселенной составляет менее одного процента.

Проявления невидимой материи наблюдали впервые в нашей Галактике.

Первые наблюдательные данные о темной материи

Наша Солнечная система, ближайшие звезды и фон слабых неразрешимых звезд, называемый Млечный Путь, принадлежат огромной звездной системе — нашей Галактике. В ее состав входят примерно 150 млрд звезд, а также межзвездный газ и пыль. Они образуют плоскую подсистему нашей Галактики или дисковую составляющую. Ее можно сравнить с гигантским диском для метания. Размер такого диска в поперечнике ~ 30 кпк,

а толщина в центральной части ~ 5 кпк. Солнце находится примерно в 10 кпк от центра.

Такую форму Галактики астрономы определили, построив распределение в пространстве звезд или так называемой светящейся материи нашей Галактики. Распределение звезд само по себе представляет интереснейший предмет исследования, однако рассуждения о нем уведут нас слишком далеко в сторону от обсуждаемого предмета. Казалось естественным, что распределение гравитационного поля должно следовать распределению звезд. Это оказалось не так. Чтобы не подвергать сомнению основные законы физики, была введена концепция темной или невидимой материи.

Звезды нашей Галактики вовлечены во вращательное движение вокруг ее центра. Их можно рассматривать как пробные частицы, движущиеся вокруг общего центра масс. Так как они двигаются в гравитационном поле нашей Галактики, то для звезды на круговой орбите можно составить уравнение баланса центробежных и центростремительных сил вида:

$$\frac{GM(r)m}{r^2} = \frac{v^2(r)m}{r}. \quad (14.1)$$

Здесь $v(r)$ скорость звезды, т.е. измеримая величина, r — расстояние от центра Галактики, а m — масса звезды (нашей пробной частицы). Теперь, пользуясь этим уравнением, можно вычислять общее количество притягивающей массы в Галактике $M(r)$ внутри радиуса r . Скорость звезд (или скорость облаков газа) измеряют по смещению спектральных линий. На рис. 14.1 представлена кривая вращения для типичной спиральной галактики. Сплошной линией показано наблюдаемое распределение скоростей по ра-

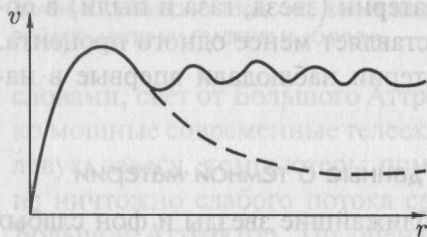


Рис. 14.1. На рисунке изображена кривая вращения типичной галактики. По вертикальной оси отложена скорость вращения пробной точки в галактике, по горизонтальной оси — расстояние до центра галактики

диусу галактики, пунктирной линией показано распределение скоростей, вычисленное по распределению видимой массы галактики. Из приведенной кривой видно, что требуется наличие некоторой невидимой массы, чтобы удовлетворить наблюдаемому распределению скоростей. Эта невидимая масса должна быть распределена по галактике значительно более равномерно, в отличие от светящейся материи, которая имеет тенденцию концентрироваться к центру галактик.

В нашей Галактике тоже наблюдается отклонение наблюдаемой кривой вращения от кривой вращения, вычисленной по видимой материи. Так, наше Солнце вращается вокруг Галактики со скоростью 220 км/с на расстоянии примерно 10 кпк. Другими словами, оно делает один оборот вокруг центра Галактики за 225 млн лет. На больших масштабах, скажем, $20 < r < 100$ кпк, кривая вращения большинства галактик является плоской, и это наблюдается как в оптическом, так и радиодиапазонах. Диапазоны масштабов, близкие к 100 кпк, наблюдаются по динамике шаровых скоплений и карликовых галактик, которые являются спутниками нашей Галактики.

Формы распределения темной материи

Естественно, что кривая вращения сама по себе не дает информации о форме распределения невидимой материи в нашей Галактике, о ее трехмерном распределении и ее природе. Форму ее распределения определяют из косвенных соображений, пользуясь аргументами об устойчивости дисковой составляющей нашей Галактики. Наиболее популярной сейчас является модель сферического гало, состоящего из темной материи. Часть невидимой материи в нашей Галактике может состоять из компактных тел малой массы, состоящих из обычного вещества. Тот факт, что они должны обладать малой массой, неоспорим. Если масса тела превышает $0,1 M_{\odot}$, то такое тело уже образует звезду, внутри которой должны вспыхнуть термоядерные реакции. Эти реакции приведут к излучению фотонов — тело перестанет быть невидимым. Однако такие тела, как коричневые карлики, обладающие

массой менее десяти процентов массы Солнца, или водородные карлики, подобные Юпитеру, слишком малы, чтобы светить сами. Если они не находятся в звездной системе, а блуждают внутри Галактики, они будут представлять из себя одну из форм невидимой материи.

Очень интересную гипотезу высказал известный российский физик Александр Викторович Гуревич. Он предположил существование невидимой материи, состоящей из элементарных слабовзаимодействующих частиц, так называемых нейтралино. Однако, эти частицы участвуют в гравитационном взаимодействии, которое универсально. Благодаря гравитационному взаимодействию они могут образовывать связанные объекты. Такие объекты больше похожи на облака, чем на звезды или планеты. Размеры некомпактных тел, как их назвал А. В. Гуревич, должны быть колоссальны — порядка одной или нескольких астрономических единиц, т. е. больше, чем расстояние от Земли до Солнца! Однако их масса значительно меньше, чем масса Солнца. Плотность их меньше, чем плотность воздуха. Тем не менее они будут стабильными образованиями. Такие некомпактные объекты могут существовать в течение времени, сравнимого со временем жизни нашей Галактики.

Надо отметить, что астрономам известны звезды таких колоссальных размеров — это сверхгиганты, размер их превосходит размер орбиты Марса в нашей солнечной системе.

Компактные барионные тела и некомпактные тела, состоящие из слабовзаимодействующих частиц, могут быть наблюдаемы с помощью эффекта микролинзирования. Он был открыт в нашей Галактике в 1993 г. Пару слов о нем мы уже сказали во введении.

Невидимая материя существует не только в галактиках, но также и в скоплениях галактик. Существуют концентрированные скопления галактик и рассеянные скопления. Даже сконцентрированные скопления галактик, обладающие сферической симметрией, на вид значительно более разреженные, чем шаровые звездные скопления. Богатых скоплений, обладающих большим количеством галактик, мало. Однако это одни из самых больших объектов во Вселенной как по размерам, так и по массам.

Оценивать количество невидимой материи, принадлежащей скоплениям галактик, можно несколькими способами. Один из таких способов — оценивать полную гравитационную массу скоплений галактик по вириальным скоростям отдельных галактик. Второй — по температуре межгалактического газа, принадлежащего скоплению. Существует еще один способ оценки полной массы, а следовательно и невидимой материи — по слабому микролинзированию. Оценку гравитационной массы скоплений по эффекту слабого линзирования рассмотрим ниже, в главе, посвященной гравитационным линзам.

Наблюдения вириальных скоростей галактик (которые являются мерой гравитационного потенциала системы галактик), а также наблюдение горячего газа в скоплениях галактик (предполагается, что газ является гравитационно связанным с рассматриваемым скоплением) показывает, что средняя плотность Вселенной зависит от масштаба, на котором ее оценивают.

Астрономы пришли к заключению, что галактики должны обладать протяженным гало с размером $R \sim 150\text{--}200h^{-1}$ кпк, отношение $\frac{M}{L}$ — «масса—светимость», которое является индикатором скрытой массы¹⁾, составляет примерно $\frac{M}{L} \sim 100h$ для спиральных галактик и $\frac{M}{L} \sim 400h$ для эллиптических галактик. Другими словами, отношение массы невидимой материи к видимой может составлять ~ 100 для эллиптических галактик. Оценив вклад как галактик, так и межгалактического вещества, авторы пришли к выводу, что параметр Ω (отношение средней плотности Вселенной к критической плотности) заключен в пределах 0,3–0,4 при $H = 100$ км/с/Мпк. Оценка средней плотности Вселенной, сделанная по галактикам и скоплениям галактик, относится к масштабам, лежащим в пределах от 10–50 кпк до 30 Мпк.

Таким образом, накапливаются экспериментальные данные, которые свидетельствуют о том, что средняя плотность Вселенной превышает 0,2 от критической плотности (ρ_{crit}) и может быть даже равна ей. В том случае, если общая плотность Вселенной

¹⁾ Напомним, что для звезд солнечного типа отношение «масса—светимость» лежит в пределах $\frac{M}{L} \approx 3\text{--}4$.

составляет менее десятой части от критической плотности ρ_{crit} , невидимое вещество может находиться в форме невидимого барионного компонента. Если же плотность значительно больше, чем $0,05\rho_{\text{crit}}$, то в нашей Вселенной есть, по крайней мере, два типа невидимой материи. Второй тип — газ слабовзаимодействующих частиц, таких, например, как массивные нейтрино или аксионы. Эта часть невидимой материи равномерно заполняет скопления галактик, т. е. масштабы 10 Мпк. Непосредственно наблюдать эти формы материи невозможно, она невидима, однако по ее гравитационным проявлениям можно заключить, что плотность ее составляет примерно $\Omega \approx 0,3$.

Нельзя, однако, исключить, что помимо кластеризованной, неоднородно распределенной формы материи, существует однородный фон невидимого вещества. Последний наиболее точно измеряется в экспериментах по $\frac{\delta T}{T}$ (по анизотропии реликтового излучения). Общая плотность невидимой материи, с учетом распределенной равномерно в пространстве, может достигать $\Omega \approx 0,6-1$.

Поиски частиц темной материи

Астрономы исследуют распределение темной материи астрономическими методами — по гравитационному линзированию, кривым вращения, вириальным скоростям, крупномасштабному распределению галактик. Микролинзирование в нашей галактике указывает на то, что по крайней мере часть невидимого вещества представлена в виде компактных или некомпактных несветящихся тел (которые являются гравитационно связанными), которые заполняют диск и гало нашей Галактики. Тем не менее, наблюдения показывают, что таких тел мало для решения проблемы темной материи. Вполне вероятно наличие невидимой материи, представленной в форме отдельных массивных слабовзаимодействующих частиц.

Поэтому проблема природы невидимой материи, очевидно, должна также решаться и методами физики. Существование нового вида материи уже само по себе является вызовом сообществу физиков, который требует ответа.

Физики-экспериментаторы решают эту проблему своими методами. Если темное вещество представляет из себя слабовзаимодействующие частицы, такие, например, как нейтралино, то их можно зарегистрировать методами физики элементарных частиц. Несмотря на то, что частицы взаимодействуют слабо, они все-таки оказывают свое действие на обычные частицы — протоны, нейтроны и электроны. Взаимодействие двух элементарных частиц обычно характеризуется сечением их рассеяния.

Впервые, по-видимому, рассеяние наблюдал великий английский физик Э. Резерфорд в экспериментах с альфа-частицами (теперь мы знаем, что это ядра гелия, испускаемые некоторыми радиоактивными элементами) в начале нашего века. В экспериментах Резерфорда альфа-частицы летели по прямой линии внутри полый стеклянной трубки, из которой был откачен воздух. В конце 4,5-метровой трубки находилась мишень — тонкая фольга, сделанная из какого-либо однородного химического элемента. В качестве мишени выбирались атомы чистых металлов — от алюминия до свинца. Физики наблюдали следующее явление. Частицы летели по прямой линии вплоть до мишени, внутри которой что-то происходило. В результате этого процесса альфа-частицы меняли свое направление, отклонение от первоначального направления доходило до 2° , а иногда даже наблюдались отскоки в обратную сторону! Другими словами, происходил обмен энергией и импульсом между альфа-частицей и ядром мишени.

Для характеристики такого обмена было введено понятие сечения рассеяния. Что это такое? Оно измеряется в единицах площади, скажем, в см^2 и характеризует вероятность того, что две элементарные частицы провзаимодействуют. Умножая сечение рассеяния частицы σ на плотность мишени n (которая в данном случае измеряется в единицах — число частиц/ см^3) и на длину пути проходимого частицей внутри мишени l , мы получаем оценку вероятности p для нее провзаимодействовать с каким-либо ядром мишени:

$$p \sim \sigma n l. \quad (14.2)$$

Сечение рассеяния слабовзаимодействующей частицы, такой, например, как электронного нейтрино с веществом (при энергиях

нейтрино порядка 1 МэВ), есть $\sigma \sim 10^{-44} \text{ см}^2$. Значит, для того чтобы нейтрино с вероятностью 1 оказало влияние на детектор, сделанный из обычного вещества, необходимо взять цепочку атомов длиной в 300 кпк и пропустить нейтрино через все эти атомы. Конечно, такого количества вещества в нашем распоряжении нет, но и нейтрино не одно. Поток нейтрино от известных нам космических объектов достаточно интенсивный, так что если подождать некоторое время, то одна из частиц обязательно взаимодействует с атомом мишени (детектора элементарных частиц), а физики-экспериментаторы регистрируют последствия такого взаимодействия.

Гипотетические частицы, которые составляют темное вещество нашей Галактики, имеют сечение рассеяния на порядки меньше, чем у нейтрино. Поэтому для регистрации таких частиц физики должны выбирать детекторы, обладающие большой массой, и ждать одного акта взаимодействия достаточно долго.

Один из таких детекторов, название которого DAMA, расположен внутри горы с названием Гран Сассо, расположенной в Италии. Итальянские физики пытаются зарегистрировать на нем слабовзаимодействующие частицы (иногда их зовут ВИМП'ы).

Детектор состоит из 100 кг чистого NaI и двух литров жидкого ксенона, который используется как сцинтиллятор. Чувствительные элементы были покрыты 10-сантиметровым слоем чистой меди и 15-сантиметровым слоем свинца и помещены в дополнительный кожух из низкоактивной меди для защиты от внешних обычных излучений. Гора используется как естественный дополнительный щит от быстрых космических частиц. Прибор рассчитан на регистрацию слабовзаимодействующих частиц (чье сечение рассеяния меньше или порядка 10^{-42} см^2) с массами, лежащими в диапазоне от нескольких ГэВ до сотен ГэВ. Основной физический механизм взаимодействия — упругое рассеяние.

Лидер группы физиков Рита Бернабей недавно сделала сенсационное заявление о том, что обнаружены неизвестные частицы с чрезвычайно слабым взаимодействием $\sigma \approx 7 \cdot 10^{-6}$ пикобарн (1 пикобарн = 10^{-36} см^2) и массой $m \approx 60$ ГэВ. Более

того, исследователи обнаружили сезонную модуляцию сигнала, связанную с движением Земли вокруг Солнца. Отклик детектора по многим параметрам напоминает предсказываемый сигнал от нейтралино.

Если итальянские физики действительно открыли невидимое вещество, то это важно не только для астрономии и космологии, но также и для физики, поскольку это первое свидетельство существования суперсимметричных частиц, партнеров частиц обычного мира. Это также будет косвенным подтверждением тех суперсимметричных теорий объединения физических взаимодействий, о которых сейчас так много пишут физики.

Невидимое вещество открыто, оно существует, природа его пока еще остается загадочной, но несомненно, будет раскрыта в ближайшие несколько десятилетий. Кажется удивительным, что наша Вселенная на 90 % по массе состоит из неизвестной нам формы материи. Однако этот вывод, по-видимому, неизбежен.

Гравитационные линзы

История открытия гравитационных линз и их эффектов очень поучительна. Это один из тех немногих феноменов в истории астрономии, которыми теоретики могут заслуженно гордиться. Идея гравитационной фокусировки была высказана задолго до открытия первой линзы. А. Эйнштейн, Г. А. Тихов, О. Хвольсон, Ф. Цвикки — вот неполный список ученых, предсказавших это явление еще в начале двадцатого столетия (вскоре после создания общей теории относительности). Ученые оценили вероятность обнаружить явление гравитационной линзы для линзирования на звездах. Эта вероятность оказалась очень мала — она равна вероятности совпадения линзируемого источника света и линзы — звезды внутри кружка с угловым размером в несколько миллисекунд дуги! Если вспомнить, что общая площадь небесной сферы составляет 40 000 квадратных градусов, то легко оценить вероятность случайного совпадения — это число с 18 нулями после запятой. Для того времени эффект оказался не слишком интересным, его открытие «отложили» до лучших времен.

В 1960-х годах вновь пробуждается интерес астрономов к вопросам, связанным с гравитационными линзами. Этот интерес был проявлен астрономами-теоретиками. Поток теоретических работ нарастал. Многие свойства гравитационных линз были поняты задолго до их открытия. Прежде всего предложили искать эффект гравитационной линзы не на звездах, а на галактиках. Они массивнее, размер «кружка», в который должен попасть источник света, значительно больше — несколько угловых секунд. Самых галактик тоже больше, чем звезд — вероятность найти эффект уже оценивалась как 0,01.

Открыли же гравитационные линзы в 1979 г. Два английских астронома Д. Волш и Р. Карсвелл обнаружили два квазара QSO 0957 + 561 A,B, находящихся на угловом расстоянии всего $\sim 6''$ друг от друга. Три буквы в названии означают квазар, следующие четыре цифры — прямое восхождение $\alpha = 9^h 57^m$, а три цифры после знака плюс — склонение $\delta = 56^\circ$; буквы A и B указывают на наличие двух изображений. Вначале эту пару квазаров пытались объяснить явлением двойного квазара. Это два различных квазара, связанные общим гравитационным полем. Такие объекты во Вселенной не редкость. Достаточно сказать, что только в нашей Галактике существует много двойных звезд — две звезды, связанные общим гравитационным полем. Так что предположение о двойном квазаре было естественным и... неверным. Подробный анализ показал, что это предположение противоречит наблюдательным фактам. Тогда астрономы вспомнили о явлении гравитационных линз. Спектры двух изображений, их красные смещения были совершенно идентичными, что и дало основание для гравитационно-линзовой интерпретации явления. Последние сомнения астрономов исчезли, когда открыли галактику-линзу. Расстояние между компонентами A и B составляет $6,1''$, галактика G расположена почти вплотную к объекту B.

Благодаря подробным теоретическим расчетам ученые смогли объяснить наблюдаемые квазары проявлением действия гравитационной линзы. Стало ясно, что наблюдаются два изображения одного и того же квазара. Открытие галактики-линзы, лежащей между земным наблюдателем и квазаром, окончательно подтвердило сделанную интерпретацию. Началось активное исследование данного космического феномена, продолжающееся до сих пор.

В последнее десятилетие XX века было обнаружено явление гравитационного линзирования звезды на звезде. В этом случае угловое расстояние между звездой-линзой и звездой-источником света составляет порядка миллисекунды дуги! В связи с этим явление было названо микролинзированием.

Гравитационные линзы — один из самых интересных объектов изучения для космологии и астрономии в целом. В космологии они дают возможность измерять скрытую материю на самых

разных масштабах масс — от планетных масс до масс сверхскоплений галактик. Они могут быть инструментом, помогающим изучать внешние части галактики-линзы, а также дают информацию о скоплениях галактик. Они могут играть роль «увеличительных линз», сквозь которые наблюдатель увидит структуру далекого квазара с большим угловым увеличением. В космологии гравитационные линзы также дают возможность определения «стандартного метра» — одного из самых точных способов измерения космологических расстояний.

Свет от удаленного квазара распространяется в гравитационном поле галактики-линзы, лежащей от нас на расстоянии сотен миллионов световых лет. Значит, есть возможность изучать гравитационную физику на временном интервале, удаленном на сотни миллионов лет, и делать выводы о неизменности (или, быть может, в будущем, о слабых вариациях) ньютоновской гравитационной константы на протяжении гигантских промежутков времени.

Открытие «экзотических» гравитационных линз, таких как космические струны или изолированные черные дыры сверхбольшой массы, позволит изучать предсказываемые современной физикой объекты с сильным гравитационным полем.

Как устроены гравитационные линзы

Известны четыре основных взаимодействия: электромагнитное, слабое, сильное и гравитационное. Самым известным взаимодействием является электромагнитное, оно используется даже в быту. Электромагнитное взаимодействие отвечает за связь между ядром и электроном в атоме, его переносчики — фотоны — дают нам большую часть информации о Вселенной. Это взаимодействие обеспечивает силы упругости в твердых телах и силы трения, связь отдельных атомов в молекулах и связь отдельных молекул в веществе.

Электрическое взаимодействие осуществляется только между электрически заряженными телами, между нейтральными телами оно отсутствует. Слабое взаимодействие эффективно начинает действовать на сверхмалых расстояниях. Сильное взаи-

модействие оказывает влияние на стабильность ядер, связывает между собой протоны и нейтроны в ядре, но не действует, например, на электроны.

Особняком в этом списке физических взаимодействий стоит четвертое — гравитационное взаимодействие. Оно универсально. Все частицы, независимо от их свойств, одинаковым образом ускоряются гравитационным полем. Это свойство гравитации нашло свое отражение в принципе эквивалентности — фундаментальном принципе общей теории относительности, который гласит, что в гравитационном поле все тела ускоряются одинаково независимо от состава. Радиус его действия бесконечен, оно действует в лабораторных масштабах, в масштабах нашей солнечной системы и даже в масштабах всей Вселенной.

Можно сказать, что искусственный спутник Земли, электрон и фотон притягиваются Землей с одинаковым ускорением, равным $9,8 \text{ м/с}^2$. Притягиваются они одинаково, но двигаются по разному. Форма кривой, по которой движется каждое тело, зависит от величины и направления его начальной скорости. Спутник может перемещаться по эллипсу вокруг Земли, а может и по гиперболической траектории. Для этого ему необходимо сообщить скорость $\sim 11 \text{ км/с}$. Для тела, пролетающего мимо Земли, траектория будет тем ближе к прямой линии, чем больше его скорость. Самая большая в природе скорость у света. Поэтому фотоны движутся почти по прямой линии.

«Почти» означает, что траектория все-таки не прямая. Она немного искривлена. Если провести две касательные линии к такой траектории, причем одна из касательных расположена до притягивающего тела, а вторая — после, то они будут пересекаться под некоторым углом. Этот угол очень мал.

Искривление траектории фотона вблизи притягивающей массы было предсказано А. Эйнштейном, а открыто А. Эддингтоном во время одного из полных солнечных затмений. Эффект невелик — луч света от далекой звезды, проходя мимо солнечного лимба, отклоняется всего на $1,75''$. А. Эддингтон измерил положения звезд вблизи солнечного диска во время затмения (вне затмения звезды рядом с Солнцем не видны) и сравнил их с истинными положениями, измеренными ночью в другое время

года, когда гравитационное поле Солнца не искажает траекторию их лучей. Из этого сравнения он получил величину эффекта, которая оказалась в хорошем согласии с величиной, предсказанной А. Эйнштейном.

Два луча света, прошедшие по разные стороны звезды и отклоненные от прямого пути, должны пересечься (см. рис. 15.1). Наблюдатель, находящийся в точке пересечения, увидит два изображения одной и той же далекой звезды. Это, по существу, и есть эффект гравитационной линзы.

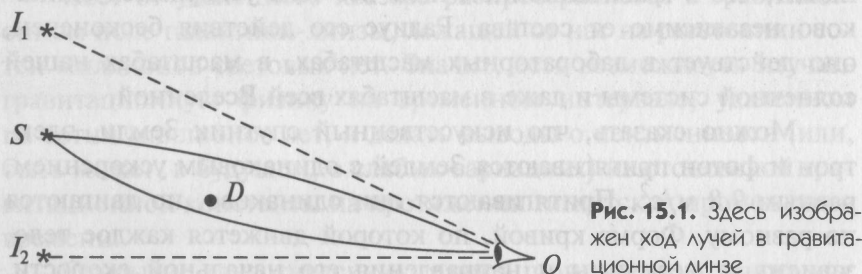


Рис. 15.1. Здесь изображен ход лучей в гравитационной линзе

Рассмотрим явление гравитационной линзы, как его видел бы наблюдатель, имеющий телескоп с высокой разрешающей силой. В качестве линзы мы рассмотрим небесное тело D , обладающее сферической симметрией. Гравитационное поле такого тела также обладает сферической симметрией.

Изображение далекой звезды S в поле тела D превратится в два «лунных серпа», зеркально отраженных друг от друга (рис. 15.2). Правда, размеры и яркость изображений будут разными, но суммарный блеск всегда больше блеска нелинзированного источника S .

При наблюдении внегалактических линз, когда в качестве линзы выступает какая-либо галактика, угловое расстояние между различными изображениями составляет примерно одну секунду дуги. При наблюдении микролинзирования угловое расстояние составляет всего одну миллисекунду дуги. Наблюдать в оптическом диапазоне два изображения, разделенные расстоянием в одну секунду дуги, хотя и трудно, но можно. Поэтому внегалактические линзы исследуют, изучая структуру изображений.

Наблюдать в оптическом диапазоне два изображения, разделенные угловым расстоянием порядка миллисекунды дуги, с Земли невозможно. Однако, здесь приходит на помощь переменность в эффекте линзирования. Источник света S и линза D обладают взаимным движением. Точнее все небесные источники движутся по небу. Линзы не являются исключением. Только в случае внегалактических объектов движение по небесной сфере очень медленное — для того, чтобы галактика «прошла» расстояние в секунду дуги, требуются сотни тысяч лет. В случае линзирования звезды на звезде это движение гораздо быстрее — звезды ближе к нам, угловая скорость движения больше! Это легко себе представить, наблюдая проезжающий автомобиль на фоне далекого самолета. Автомобиль ближе, поэтому он проходит большее угловое расстояние за то же время. Самолет дальше, поэтому кажется, что он движется медленнее. Время переменности в случае микролинзирования составляет порядка месяца, нескольких месяцев. Поэтому микролинзирование исследуют по изменению блеска линзируемой звезды S .

Чтобы понять, как это делается, рассмотрим движение источника S на фоне линзы D (рис. 15.3).

Два изображения возникают лишь в случае сферически симметричной гравитационной линзы. Гравитационные поля многих космических объектов (например, галактик) не обладают сферической симметрией. В таких случаях возникает нечетное количество изображений одного объекта с разными звездными

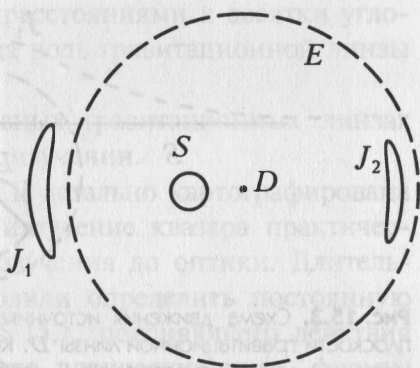


Рис. 15.2. Изображение эффекта гравитационной линзы в картинной (перпендикулярной лучу зрения) плоскости. Пунктиром показан размер конуса Эйнштейна, описанного вокруг тела D . Если источник света S попадает внутрь этого круга — появляется эффект гравитационной линзы. На рисунке истинное положение источника света S — внутри конуса Эйнштейна, в результате чего он дает два изображения: J_1 — основное изображение, которое находится вне конуса, и J_2 — вторичное изображение, которое находится внутри конуса

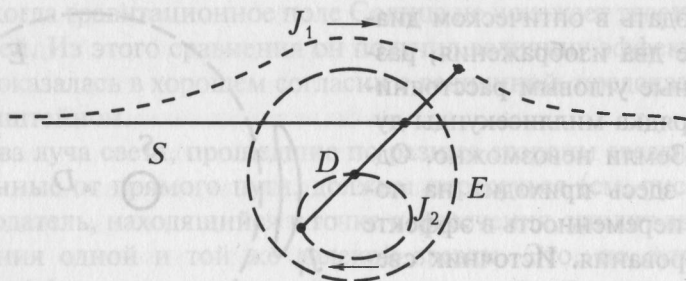


Рис. 15.3. Схема движения источника света и его изображений в картинной плоскости гравитационной линзы D . Конус Эйнштейна вновь показан пунктиром. Истинное движение источника S изображено сплошной линией, а направления движения стрелкой. Движение изображения J_1 происходит вне конуса Эйнштейна — оно показано пунктирной линией, а направление движения совпадает с истинным направлением движения источника S . Движение вторичного изображения J_2 противоположно по направлению истинному и происходит по замкнутой траектории вблизи гравитационной линзы D внутри конуса Эйнштейна

величинами. Усиление (или ослабление) излучения источника — еще один важный эффект гравитационного линзирования.

Несколько примеров гравитационных линз

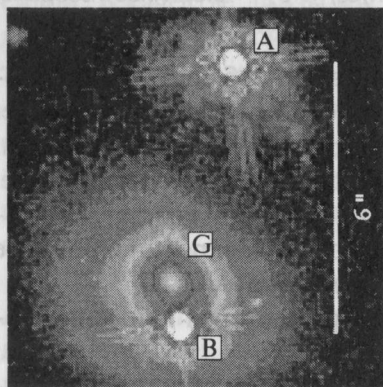


Рис. 15.4. На рисунке показано положение изображений A и B в первой гравитационной линзе QSO 0957 + 561 A,B; буквой G помечена галактика-линза

Впервые эффект гравитационной линзы был открыт на внегалактических объектах. Первая и теперь самая хорошо исследованная линза — QSO 0957 + 561 A,B (рис. 15.4). За двадцать лет со времени открытия объекта QSO 0957 + 561 A,B было открыто много новых гравитационных линз. Сейчас общее число кандидатов на их роль приблизилось к 50 и постоянно растет. Наиболее достоверно известны 24 линзы. Угловые расстояния между компонентами в разных линзах меняются и составляют от $0,77''$

до $6''$, но существуют объекты с расстояниями в десятки угловых секунд. Они возникают, когда роль гравитационной линзы играет скопление галактик.

Расскажем о самых интересных гравитационных линзах и о фактах, обнаруженных при их изучении.

В объекте QSO 0957 + 561 A,B детально картографирована структура линзы и исследовано излучение квазара практически во всем диапазоне от радиоизлучения до оптики. Длительные измерения его блеска позволили определить постоянную Хаббла новым способом. Из рис. 15.1, поясняющего действия гравитационной линзы, видно, что оптические пути, формирующие два изображения, различны. Значит, свет по разным путям будет идти разное время. Поэтому, если в квазаре произойдет вспышка, она достигнет наблюдателя сначала по кратчайшему пути, а затем по более длинному, т. е. повторится во втором изображении (в угловой мере более близком к галактике-линзе). Измерив разность моментов прихода сигнала, можно определить разность оптических путей, что в совокупности с известным угловым расстоянием между изображениями позволяет измерить расстояние до квазара и галактики-линзы. Сравнивая это расстояние с красным смещением объектов, можно вычислить постоянную Хаббла. Несколько групп ученых, включая группу астрономов из Специальной астрофизической обсерватории на Северном Кавказе, измеряли блеск двух компонентов А и В в течение приблизительно 10 лет. Самые последние оценки постоянной Хаббла на основании этих наблюдений дают возможность понизить верхний предел ее значения до 70 км/с/Мпк . Эта точность сравнима с точностью других методов, но в отличие от традиционных методов внегалактической астрономии, не обладает систематическими погрешностями.

Другой замечательный объект — QSO 2237 + 030, носит название «крест Эйнштейна» (рис. 15.5). Это квазар с красным смещением $z = 1,7$. Ядро обладает квадрупольным распределением плотности, и в результате образуются четыре изображения, расположенные крестом.

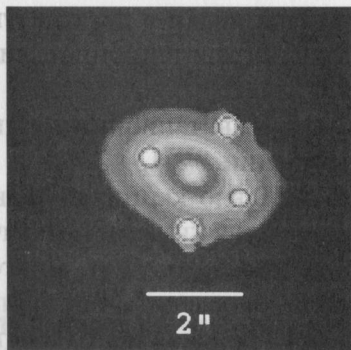


Рис. 15.5. На рисунке показано положение изображений в линзе «крест Эйнштейна»

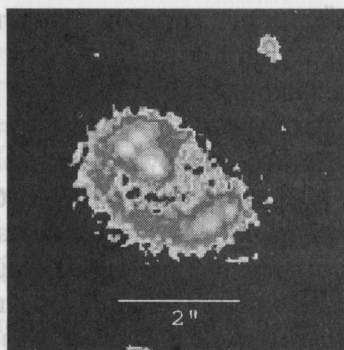


Рис. 15.6. «Кольцо Эйнштейна», как его видят радиоастрономы. Серпы двух изображений сливаются друг с другом, образуя единый объект

В таком объекте, помимо измерения постоянной Хаббла, можно попытаться найти и эффект микролинзирования. Он возникает, когда луч «квазар—Земля» пересекается одной из звезд галактики-линзы. В результате образуется добавочное расщепление луча, появление добавочных изображений и изменение их суммарного блеска. Само расщепление луча и возникновение добавочных изображений составляет несколько десятков микросекунд дуги и не может быть измерено современными методами. Однако, изменение блеска составляет десятые доли звездной величины, что вполне доступно измерениям.

Третий объект, заслуживающий внимания, — MG 1131 + 04 («кольцо Эйнштейна») — открыт в радиодиапазоне при наблюдениях на VLA (рис. 15.6). На частоте 5 ГГц он выглядит как несколько растянутое кольцо, а на 15 ГГц форма его становится серповидной, причем оба конца серпа почти смыкаются. В каком случае может возникнуть такое изображение! Чем ближе звезда-источник к линзе, тем ближе концы обоих «серпов» друг к другу. В том случае, когда источник и линза находятся на одной прямой, возникает кольцеобразная структура. Анализируя изображение этого объекта в разных частях спектра, включая оптическую часть, можно делать выводы о сравнительных размерах областей источника, излучающих в радио- и оптическом

диапазонах. Получается нечто, похожее на гигантский «космический телескоп», который позволяет рассматривать далекие квазары с большим линейным увеличением. Сейчас открыты по крайней мере три типа «кольца Эйнштейна» (два — на северном небе, один — на южном).

Следующим в нашем списке необычных объектов стоит отметить особо экзотический случай — поле двойных галактик. Л. Кови с соавторами открыли его в области неба с координатами $\alpha = 02^h 49^m$ и $\delta = -18^\circ$. В отличие от других участков небесной сферы, где галактики, в общем, тоже не редкость, на этом участке галактики располагаются парами. На площадке размерами $45'' \times 45''$ ученые нашли пять пар галактик, обладающих одинаковыми свойствами. Такую картину может дать гравитационная линза, называемая космической струной. Космические струны — экзотические объекты, предсказанные физиками. Они, если только существуют, представляют собой остатки Большого Взрыва. Линейная плотность струны такова, что на отрезке в несколько десятков килопарсек содержится масса, равная массе целой галактики. При этом поперечные размеры струны значительно меньше размеров атомного ядра.

Если в данном случае действительно наблюдается космическая струна, то астрономы получают возможность исследовать состояние материи при энергиях, близких к 10^{16} ГэВ, т. е. при энергиях, на 12 порядков больше, чем у самых мощных ускорителей. Когда свет от далекой галактики проходит мимо скопления галактик, наблюдаются объекты, похожие на светящиеся дуги. При этом возникает один или несколько «серпов» — искаженных изображений истинного источника. Продольные размеры некоторых дуг достигают $26''$. С их помощью астрономы изучают распределение темной материи внутри скопления светящегося вещества в линзируемом объекте и многое другое.

Итак, на наших глазах рождается новая область исследований, которую можно было бы условно назвать «гравитационно-оптическая астрономия». Новое поколение оптических, радио- и рентгеновских телескопов, обладающих большой чувствительностью и большим угловым разрешением, позволит в дальнейшем получать еще более удивительные результаты.

Что открыли астрономы?

Эта глава является самой короткой не потому, что нечего сказать, а потому, что предмет обсуждения неясен еще самим астрономам и космологам. Тем не менее ввиду важности открытия я выделил обсуждение этого предмета в отдельную главу. Итак, что же открыли астрономы?

Ускоренное расширение Вселенной

Мы уже упоминали об открытии ускоренного расширения нашей Вселенной. Это возможно лишь в том случае, когда ускорение во втором фридмановском уравнении $\Lambda > 0$ (см. 4.7).

Ускоренное расширение в космологической модели Фридмана требовало наличия положительного Λ -члена, который был впервые введен в уравнения общей теории относительности еще самим А. Эйнштейном. Позже Эйнштейн сожалел об изменениях уравнений ОТО (см. [2]), называя введение Λ -члена «самой большой ошибкой жизни». В начале века Λ казалась новой фундаментальной постоянной. Причины появления этой фундаментальной постоянной были загадочны.

Однако, после создания квантовой теории поля физики начали обсуждать возможную природу космологической постоянной. В квантовой физике вакуум стал обладать нетривиальными свойствами. В нем существовали виртуальные процессы. Оказалось, что вакуум должен обладать определенной плотностью. Я. Б. Зельдович в 1967 г. показал, что вакуум эквивалентен материи с определенной плотностью ρ_{vac} и сверхсильным отрицательным давлением $p = -\rho_{\text{vac}}c^2$.

Надо заметить, что о плотности энергии вакуума писал еще Р. Фейнман. Каждое квантовое поле (например, электромагнитное) обладает нулевыми колебаниями на каждой моде (см. главу 6):

$$E = \sum \frac{\hbar\omega}{2}, \quad (16.1)$$

В этом уравнении проводится суммирование по всем модам колебаний. Поскольку частоты волны могут меняться от 0 до ∞ , то сумма является бесконечной величиной. Более того, в каждом кубике конечного объема L^3 плотность энергии $\rho_{\text{vac}} = \frac{E}{L^3}$ является бесконечной величиной.

Вычислению квантовых эффектов наличие бесконечной плотности энергии не мешало, хотя во многих экспериментах квантовой физики наличие вакуума виртуальных частиц приводило к значимым изменениям физических параметров. Физики чувствовали себя весьма комфортно, зная про бесконечную плотность вакуума, хотя некоторые из них и ощущали слабое беспокойство. Для того, чтобы избавиться от бесконечности, физики приводили следующие аргументы: конечно, в будущей теории появится так называемая энергия обрезания, которая будет характеризоваться максимальным импульсом и максимальным волновым числом $p = \hbar k$, тогда плотность энергии станет хотя и большой $\rho_{\text{vac}} = \hbar \frac{k^4}{16\pi^2}$, но конечной. Уже в наше время физики изобретают рецепты, позволяющие избавиться от бесконечной плотности вакуума, но пока это не получается.

Для нас самое главное в этой истории исследования Λ -члена является то, что физики начали исследовать механизмы так называемой динамической генерации Λ -члена. В новой физической теории Λ может не являться новой фундаментальной постоянной. Она может возникнуть в нашей Вселенной в результате действия некоторых физических процессов, затем стать равной нулю (или очень небольшой по величине).

После создания теории скалярного поля начались исследования механизмов генерации Λ -члена. Особенно интенсивно они проводятся после открытия ускоренного расширения Вселенной. Нейл Тюрк из Кембриджского университета предложил механизм генерации, основанный на скалярном поле, которое создает

переменный вакуум в современной нам Вселенной. В. А. Рубаков и А. А. Старобинский предложили новые механизмы генерации Λ -члена в виде скалярного поля или двух скалярных полей. Italianские физики К. Рубано и П. Скуделларо предложили детальную модель скалярного поля, которое генерирует ускоренное расширение нашей Вселенной, а также сравнили эту модель с наблюдениями. Эта модель прекрасно согласуется с наблюдениями. Но как можно проверить ее непосредственно? Космологи сейчас думают над этой проблемой...

Итак, новая фундаментальная постоянная или новый вид материи?

Как видно из уравнения (4.7), положительность ускорения A возможна лишь в случае $\rho + \frac{3p}{c^2} < 0$. Плотность отрицательной быть не может — отрицательным может быть только давление. Поэтому для того чтобы наша Вселенная ускорялась, она должна быть заполнена веществом с отрицательным давлением. Λ -член эквивалентен веществу, однородно заполняющему всю Вселенную, причем давление такого вещества отрицательно, $p = -\rho c^2$. Конечно, для правильной интерпретации существующих наблюдений звезд типа SN Ia допускается также существование вещества со значительно более «мягким» уравнением состояния (вплоть до $p < -0,6\rho c^2$). Вещество должно быть очень странным, скорость звука в нем является мнимой величиной. Это значит, что вещество неустойчиво, любое сколь угодно малое возмущение плотности в таком веществе будет расти по закону экспоненты, состояние должно быстро разрушаться. Сейчас космологи построили несколько моделей такого вещества, хотя непонятного в этом новом типе материи больше, чем осознанного.

Интересный вид материи был рассмотрен Александром Каменщиком и его коллегами. Они предложили в качестве наполнителя Вселенной так называемый газ Чаплыгина. Этот газ придумал в прошлом веке знаменитый российский аэродинамик Чаплыгин. Газ обладает отрицательным давлением, давление обратно пропорционально плотности! Так может быть, ускоренное расширение вызывается газом с такими необычными свойствами? В газе образуется давление, которое стремится не расширить его, а сжать.

Не хотите ли создать Вселенную?

Как создать вселенную?

Основываясь¹⁾ на данных анизотропии реликтового излучения можно сделать некоторые выводы о физических взаимодействиях в области энергий порядка 10^{16} ГэВ. Одно весьма важное заключение можно сделать уже сейчас до полной расшифровки потенциала, управляющего инфляцией: теория инфляционной Вселенной в общих чертах является верной. Во Вселенной был режим доминирования скалярного поля с характерной энергией несколько меньше, чем планковские энергии. Это первые экспериментальные данные относящиеся к физике в области энергий 10^{16} ГэВ.

Читатель, ощути пафос этих чисел!

Первые экспериментальные физические данные относились к области энергий порядка 0,1 эВ. С чем это было связано? Когда первобытный человек тер палкой о палку, вызывая огонь, он имел дело с процессами в области энергий $\sim 0,1$ эВ на молекулу. Первобытный человек, овладевший огнем, получил впоследствии от своих благодарных потомков прозвище «человек разумный».

Затем, много тысячелетий спустя, вначале экспериментально-лабораторные исследования, а затем и технологическое овладение энергиями порядка 100 КэВ–1 МэВ на атом возвестили открытие атомного века. А ведь это был продвижение всего лишь

¹⁾ Обратите внимание, что в заголовке этого параграфа слова «вселенная» написана с маленькой буквы. Это означает, что речь уже не идет об уникальном объекте. Речь идет о чем-то обыденном, о чем-то таком, что можно видеть (!) или производить (!!!) в массовом количестве.

в 1 000 000 раз по шкале энергий! Кто может предугадать, что сулит человечеству получение знаний при продвижении по шкале энергий в миллиарды миллиардов раз?

Ниже я хочу обсудить только одно из возможных следствий теории инфляционной Вселенной, новой физики и экспериментальных фактов, полученных в ходе изучения анизотропии реликтового излучения.

Недавно Алан Гус и Андрей Линде рассматривали возможность создания вселенной в лаборатории.

Звучит не только вызывающе, но и кощунственно до некоторой степени. Однако... вспомним, что средневековые алхимики мечтали вывести человека в пробирке. Почему бы современным космологам не помечтать о создании вселенной в пробирке? Они и мечтают.

Можно ли создать вселенную в лаборатории? Сама постановка вопроса кажется абсурдной, особенно в контексте того, что написано в предыдущих главах. Наша Вселенная по определению больше **любой** лаборатории. Сейчас внутри горизонта частиц Вселенной содержится вещества, состоящего из барионов, больше, чем $10^{22} M_{\odot}$!

Как создать такое количество вещества? Куда его поместить?

Тем не менее в контексте инфляционной Вселенной и современной квантовой теории поля ответ на этот вопрос не является безусловно отрицательным.

Давным давно наша Вселенная была очень маленькой (см. главу 5). Вся наблюдаемая ее часть умещалась в сфере диаметром 10^{-27} см до того, как она начала раздуваться по законам инфляции, а ее масса составляла $\sim 10^4$ г. Из такого состояния Вселенная начала раздуваться и уже через 10^{-33} с приобрела размеры порядка сантиметра, а массу порядка 10^{57} г. Надо отметить, что масса Вселенной тогда была значительно больше, чем сейчас, большая часть массы—энергии при расширении Вселенной «ушла» в потенциальную энергию гравитационного поля.

До инфляции количество массы, необходимой для создания условий, приближенных к нашей Вселенной, не так уж и велико. Вот только «вognать» эту массу в объем пространства размером 10^{-81} см³... Ясно, что сегодня это сделать невозможно. Но может

быть, это можно будет сделать в будущем? Человечество развивается быстро (несмотря на отдельные задержки). Повторим аргументы Ферми, который определил характерное время развития как ~ 100 лет. Разделив время существования Вселенной на этот характерный интервал, мы получаем большое число. Отсюда можно заключить, что у цивилизации в целом хорошие шансы.

Но не будем мечтать о будущем технологии, давайте лучше разберемся, не существует ли фундаментальных физических запретов на искусственное создание Вселенной? Возможен ли такой процесс без нарушения фундаментальных физических принципов? Ответ на этот вопрос не так прост. Мы уже знаем, что наша Вселенная родилась из сингулярности. Так что основной задачей, которую решали исследователи была: можно ли создать вселенную без сингулярности.

Первая проблема, которую необходимо было решить, это проблема эволюции куска вещества с отрицательным давлением. Сама постановка вопроса не является новой. Ее рассматривали до А. Гуса японские исследователи в группе проф. К. Маеда, а также российские исследователи в группе проф. В. А. Кузьмина. Новый элемент, привнесенный Гусом, — это решение квантовой задачи и анализ ситуации искусственного рождения вселенной.

Для того, чтобы Вселенная начала раздуваться, необходимо отрицательное давление. Оно дает первоначальный толчок, разгоняет Вселенную, формирует однородное и изотропное расширение. Однако, что такое отрицательное давление в вакууме? Представим себе кусочек вещества с сильным отрицательным давлением внутри. Из повседневного опыта мы знаем, что газ с положительным давлением внутри, будучи помещенным в вакуум, разлетается. Кусочек вещества с отрицательным давлением внутри должен будет схлопываться. Как решить этот парадокс?

Полузамкнутый мир

Парадокс, который был сформулирован Аланом Гусом, решается в рамках искривленного пространства-времени. Для этого рассмотрим так называемое полузамкнутое пространство. Чита-

тель уже знаком с замкнутым пространством. Его образом является поверхность сферы. Что такое полузамкнутое пространство?

Для объяснения прибегнем к методу, который используют в общей теории относительности, точнее, в ее математических методах. Этот метод называется вложение n -мерного пространства в плоское $n + 1$ -мерное пространство. Мы уже использовали этот метод для описания замкнутого пространства (двумерная сфера в трехмерном пространстве), плоского пространства (двумерная плоскость в трехмерном пространстве), открытого пространства (двумерная поверхность седла, геометрия Лобачевского в трехмерном пространстве).

Используем этот метод. Вложим в трехмерное пространство искривленную поверхность. Кривизна поверхности будет выбрана так, чтобы имитировать, скажем, радиальную часть метрики Шварцшильда, метрики черной дыры, лежащей при $r = 0$. Черная дыра — это объект с предельно сильным гравитационным полем, в котором отличие геометрии мира от плоской геометрии особенно сильно. Она является конечной стадией эволюции многих обычных звезд. Однако, на бесконечности, гравитационное поле черной дыры ослабевает, пространство, как говорят релятивисты, асимптотически стремится к плоскому.

Мы тоже выберем поверхность так, чтобы при $r \rightarrow \infty$ она становилась все более плоской.

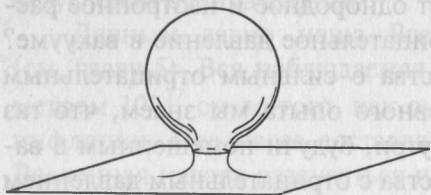


Рис. 17.1. Здесь нарисована поверхность, которая имитирует радиальную часть метрики Шварцшильда (черной дыры). Вокруг начала координат выделена окружность — она является границей «сшивки» двух геометрий, она же играет роль границы между внешним миром и полузамкнутым пространством

Вокруг начала на некотором расстоянии мы проведем окружность и завершим нашу поверхность этой окружностью (см. рис. 17.1).

Окружность — та граница, которая разделяет наш мир и полузамкнутое пространство. Осталось только взять сферу, которая играет у нас роль замкнутого мира, «срезать» ее часть, а «остаток» пришить к окружности. Космологи используют похожий

прием в математике, который, кстати, называется сшивкой, для построения модели полужамкнутого мира. Конечно, поверхность, которая описывает полужамкнутый мир, оказывается несколько более сложная, чем тот образ, который сложился в результате простых операций, однако поверхность, описывающая полужамкнутый мир, очень похожа на свой простой образ (см. рис. 17.2).

Горловина, соединяющая почти замкнутое пространство и обычное бесконечное пространство, с точки зрения наблюдателя в обычном пространстве представляет из себя «черную дыру». Однако, с точки зрения наблюдателя, который находится внутри полужамкнутого пространства, она представляет целую вселенную. Внутри полужамкнутого пространства отрицательное давление будет раздувать его так, что может сформироваться новая вселенная с большими размерами.

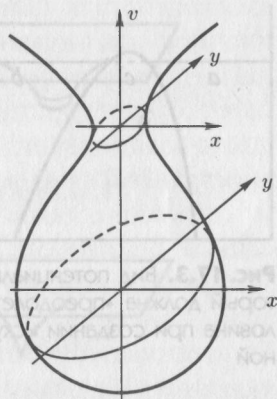


Рис. 17.2. Двумерная поверхность, которая точно имитирует радиальную часть полужамкнутого мира. Горловина является границей раздела двух миров — нашего и полужамкнутого мира, в котором может проходить процесс инфляции

Рождение нового мира

Точные уравнения, описывающие процесс создания вселенной, являются квантовыми уравнениями движения для горловины. В нашем трехмерном пространстве горловина является не окружностью, а сферой — границей между нашим трехмерным пространством и внутренним полужамкнутым миром.

Исследователи написали уравнения, которые теоретически описывали процесс создания вселенной. Выяснилось, что эти уравнения очень напоминают уравнения рождения α -частицы при распаде ядер. Здесь, как при радиоактивном распаде есть потенциальный барьер, который препятствует рождению вселенной. Только потенциальный барьер должна проходить не частица, а «сфера» — граница раздела между мирами.

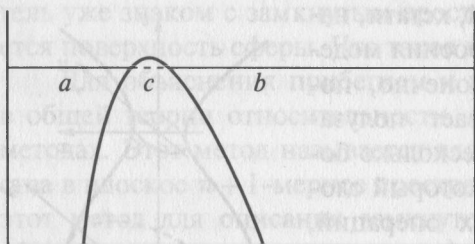


Рис. 17.3. Вид потенциального барьера, который должна «преодолеть» двумерная горловина при создании искусственной вселенной

На рис. 17.3 показана форма потенциального барьера, который должна «преодолеть» искусственная вселенная при ее создании. Алан Гус и его соавторы вычислили высоту этого барьера и выяснили условия, при которых возможно создание полужамкнутого мира и искусственной вселенной. Ста-

ло件нятно, что необходимые физические условия заключаются в том, что ~ 10 кГ вещества надо сжать до плотности $\sim 10^{74}$ г/см³.

После этого вновь рожденная вселенная начнет быстро эволюционировать. Внутренняя часть полужамкнутого мира начнет раздуваться (впрочем, мы этого не заметим), внешняя часть (черная дыра) довольно быстро (за время порядка планковского) схлопнется. Новая вселенная «отцепится» от материнской Вселенной и начнет свое независимое существование (см. рис. 17.4).

Но главное, А. Гус и А. Линде в результате исследований выяснили тот факт, что вселенную, повидимому, можно создать искусственно, в нашем почти плоском мире. Процесс создания новой вселенной не будет сопровождаться захватывающими явлениями типа внезапного образования «дыры» в пространстве или взрыва. Однако, возможно изменение свойств вакуума нашего пространства, а значит, и изменение физических свойств окружающего мира.

Андрей Линде задался еще одним важным вопросом. Какую именно вселенную можно создать в лаборатории. Действительно, если этот процесс возможен, то какие именно характеристики вселенной можно «запрограммировать»? Легко видеть, что проблема «программирования» свойств вселенной эквивалентна посланию в эту будущую вселенную.

В отличие от Вселенной, которая рождается из сингулярного состояния, когда симметрии всех физических взаимодействий восстановлены, когда, вообще говоря, невозможно различить

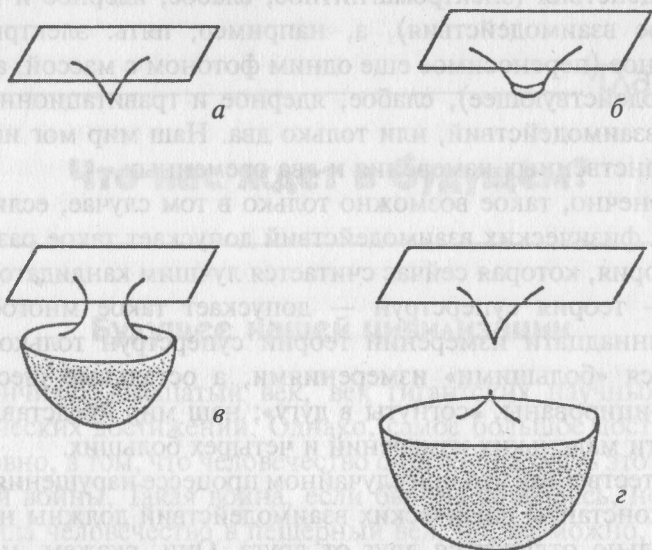


Рис. 17.4. Художественное представление процесса «отщепления» новорожденной вселенной от материнской Вселенной

взаимодействия друг от друга, вселенная, которую создают в лаборатории, создается на фоне почти плоского пространства-времени. В такой ситуации все допустимые физические симметрии являются нарушенными, все физические взаимодействия различимыми.

Поэтому представляется вполне возможным следующее развитие ситуации. При создании состояния с максимальной симметрией (создания условий для инфляции) можно так «подобрать» скорость и направление движения скалярного поля, чтобы уже после инфляции поле попало по заданному направлению на потенциальной поверхности самого скалярного поля.

Выбор положения на этой потенциальной поверхности — это выбор количества физических взаимодействий и фундаментальных констант взаимодействий. Так, скажем, в зависимости от положения физического вакуума на этой потенциальной поверхности, в нашем мире могло бы быть не четыре основных

взаимодействия (электромагнитное, слабое, ядерное и гравитационное взаимодействия), а, например, пять: электрическое, магнитное (переносимое еще одним фотоном с массой, а потому короткодействующее), слабое, ядерное и гравитационное. Или шесть взаимодействий, или только два. Наш мир мог иметь два пространственных измерения и два временных.

Конечно, такое возможно только в том случае, если теория единых физических взаимодействий допускает такое разнообразие. Теория, которая сейчас считается лучшим кандидатом на эту роль — теория суперструн — допускает такое многообразие. Из одиннадцати измерений теории суперструн только четыре являются «большими» измерениями, а остальные шесть компактифицированы, «согнуты в дугу»; наш мир представляет тор из шести маленьких измерений и четырех больших.

Естественно, что при случайном процессе нарушения симметрии, константы физических взаимодействий должны не слишком сильно отличаться друг от друга. Они, скажем, могут все оказаться порядка единицы. Но это не так в нашей Вселенной! Значит ли это, что наш мир создан искусственно, в результате процесса, контролируемого неким космологом-хакером, или все-таки он является продуктом естественных процессов?

Даже если наш мир — игра неизвестного нам интеллекта, следует отметить, что он не сделал слишком много ошибок...

Что нас ждет в будущем?

Будущее нашей цивилизации

Кончился двадцатый век, век гигантских научных и технологических достижений. Однако, самое большое достижение, безусловно, в том, что человечество смогло пережить этот век без ядерной войны. Такая война, если бы она случилась, не только отбросила человечество в пещерный век, но, возможно, уничтожило бы саму нашу цивилизацию. Какие еще опасности ждут нас в будущем? Опасен или нет технологический прогресс? Окончится он или человечество вечно будет подниматься с одной технологической ступеньки на другую?

Все эти вопросы волнуют нас, но нас также волнует не только близкое будущее, но и далекое и предельно далекое будущее. Космологи рассмотрели возможности развития человеческой цивилизации на космологических промежутках времени. Век — это очень маленький промежуток времени по сравнению с десятком миллиардов лет, которые существует наша Вселенная. Экстраполяция существования цивилизации на такой промежуток времени похожа на околонаучные спекуляции. Все-таки, давайте рассмотрим возможную эволюцию цивилизации на таком промежутке времени.

Человек разумный возник несколько десятков тысяч лет назад (согласно современной исторической науке). Одна эпоха в развитии человечества сменяла другую, современная технологическая цивилизация возникла сравнительно недавно, возникновение естественной науки связано с именами Г. Галилея, И. Ньютона, Л. Эйлера. Тогда же начала развиваться современная

технология, которая подарила нам уже в конце нашего века быстрые и сверхбыстрые средства передвижения, средства массовой информации и интерактивные средства связи, всемирную информационную сеть, человек овладел мощными и сверхмощными источниками энергии, повышением плодородия с помощью химии и генной инженерии.

Но в технологическом прогрессе таится ловушка для будущих поколений. Не буду перечислять возможные последствия для здоровья и жизни людей при пользовании достижениями современных технологий. Остановлюсь лишь на потреблении энергии и переработке информации.

Кажется очень маловероятным, чтобы любая цивилизация могла бы жить вечно. Даже если цивилизация сможет избежать естественных катастроф или самоуничтожения, она должна исчерпать все источники энергии, включая звездные источники, а также источники предоставляемые нам, например, процессом распада частиц (протонов), из которых состоим мы сами.

Американский физик Ф. Дайсон, рассматривая эту проблему, предположил, что цивилизация сможет выжить, уменьшая потребление энергии и обмен информацией по правильно рассчитанным математическим законам, при этом скорость потребления и обмена будет постоянно уменьшаться, стремясь к нулю. Даже если этот процесс возможен, жизнь в таком темном и скучном будущем вряд ли придется по душе большинству современных людей. Конечно, уменьшение скорости не означает полное исчезновение обмена информацией или потребления энергии, кроме того, можно подобрать режим потребления так, что цивилизация, за время жизни, все равно переработает бесконечное количество информации. Поэтому «субъективное» время жизни такой цивилизации (как впрочем и физическое) может оказаться бесконечным. Другие специалисты критикуют модель Дайсона, указывая на невозможность соединить разнохарактерные процессы в одной цивилизации. Поэтому многие специалисты считают, что исчезновение на космологических промежутках времени нам не избежать.

Если мы обречены на угасание, то нельзя ли отправить послание или даже представителей Земли будущим цивилизациям?

Те в свою очередь могут послать свои знания или представителей в будущее и так далее, возникнет древо цивилизаций, соединенных общим знанием. Так эту проблему недавно поставили российские космологи Вячеслав Муханов и Александр Виленкин со своими соавторами Х. Гарригой и К. Олумом. Они рассмотрели эту проблему в теории «вечной инфляции».

Вечная инфляция

Свойство инфляции быть вечной, предложенное Андреем Линде, неожиданно оказалось естественным для большого класса решений или моделей.

Рассмотрим вновь потенциал, подобный потенциалу в «новом сценарии» (см. рис. 18.1).

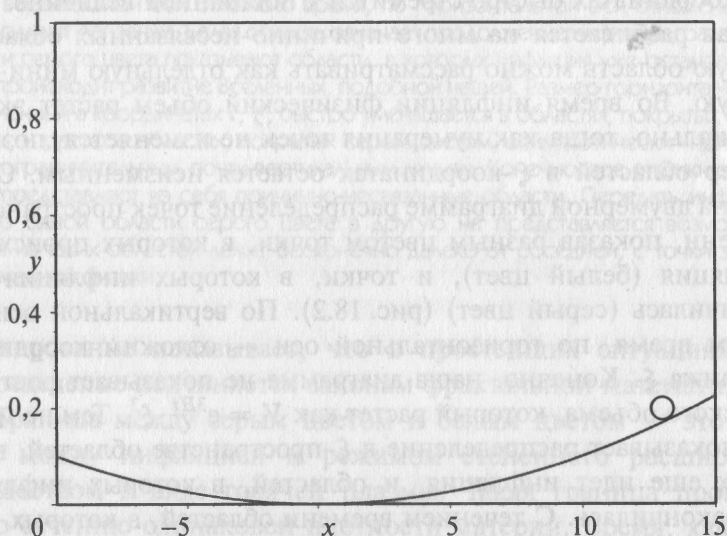


Рис. 18.1. На рисунке изображена форма потенциальной энергии одного скалярного поля. Потенциал имеет очень пологий склон. Шарик, изображающий состояние скалярного поля, в начале инфляции катится по такому склону медленно. Во время скатывания энергия ложного вакуума почти постоянная, параметр Хаббла меняется очень мало, происходит инфляция

Шарик, катящийся по пологому склону, под воздействием квантовых флуктуаций может двигаться не только в направлении минимума, но также и в направлении максимума потенциала. Естественно, что в тех местах, в которых шарик катится в направлении ямки, инфляция кончается, рождается обычная плазма, потенциальная энергия ложного вакуума выделяется, нагревая частицы плазмы и начинается эпоха Большого Взрыва. В тех частях пространства, в которых скалярное поле не меняет свою величину или даже уменьшает ее, инфляция продолжается.

Вспомним (глава 4), что положение точек и объем Вселенной характеризуются двумя способами: координатами Лагранжа ξ и координатами Эйлера x . Физический объем пространства выражается координатами Эйлера x , а координаты Лагранжа просто нумеруют частицы. Связаны они между собой масштабным фактором $x(t) = a(t) \cdot \xi$.

Горизонт частиц или размер причинно-связанной области в x -координатах быстро стремится к постоянной величине. Вселенная разбивается на много причинно-несвязанных областей, каждую область можно рассматривать как отдельную мини-Вселенную. Во время инфляции физический объем растет экспоненциально, тогда как нумерация точек не изменяется, поэтому размер областей в ξ -координатах остается неизменным. Отложим на двумерной диаграмме распределение точек пространства-времени, показав разным цветом точки, в которых происходит инфляция (белый цвет), и точки, в которых инфляция уже закончилась (серый цвет) (рис. 18.2). По вертикальной оси отложим время, по горизонтальной оси — отложим координату Лагранжа ξ . Конечно, наша диаграмма не показывает рост физического объема, который растет как $V = e^{3Ht} \cdot \xi^3$. Тем не менее она показывает распределение в ξ -пространстве областей, в которых еще идет инфляция, и областей, в которых инфляция уже закончилась. С течением времени областей, в которых продолжается инфляция, в ξ -пространстве точек становится все меньше, они занимают все меньший объем в этом пространстве, но в x -пространстве, в обычном физическом пространстве, этот объем намного превышает размеры областей, в которых уже находится горячая плазма элементарных частиц. Математическое

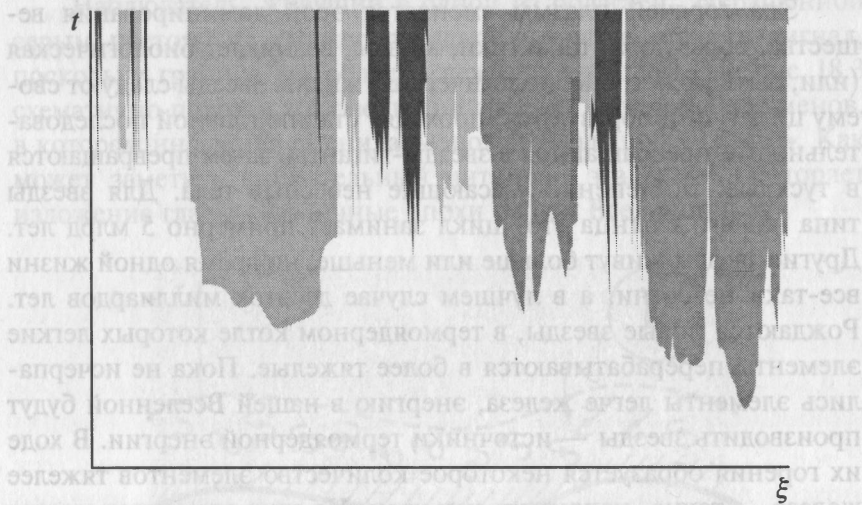


Рис. 18.2. На графике изображено распределение инфляции на плоскости t, ξ . По вертикальной оси отложено время, по горизонтальной оси отложена одна из координат Лагранжа. Белая область означает продолжение инфляции, различные оттенки серого цвета показывают области, в которых инфляция уже остановилась, в них происходит развитие Вселенных, подобной нашей. Размер горизонта частиц, вычисленный в координатах t, ξ , быстро уменьшается в областях, покрытых белым цветом, и растет в областях, покрытых серым цветом, асимптотически «прижимаясь» к ограничительным, почти вертикальным линиям. Конечно, все оттенки серого цвета представляют из себя причинно-несвязанные области. Передать информацию из одной области серого цвета в другую не представляется возможным. Каждая из таких областей лежит бесконечно далеко от соседней, с точки зрения современной физики

моделирование показывает, что в простейших ситуациях это распределение подчиняется законам фрактальной математики.

Граница между серым цветом и белым цветом — это граница между инфляцией и режимом степенного расширения с веществом в виде горячей плазмы. Такая граница проведена по сечению одинаковой плотности материи. Время, как оно определяется во фридмановской Вселенной, нумерует переход от слоя материи с одной плотностью к слою материи с другой плотностью. Поэтому направление течения физического времени фридмановского мира перпендикулярно границе, закрашенной серым цветом.

Эра горячей плазмы сменяется эрой доминирования вещества, образуются галактики, звезды, возникает биологическая (или, быть может, внебиологическая) жизнь. Звезды следуют своему циклу, они образуются, проходят стадию главной последовательности, превращаются в звезды-гиганты, затем превращаются в тусклые, постепенно угасающие небесные тела. Для звезды типа нашего Солнца этот цикл занимает примерно 5 млрд лет. Другие звезды живут больше или меньше, но время одной жизни все-таки не сотни, а в лучшем случае десятков миллиардов лет. Рождаются новые звезды, в термоядерном котле которых легкие элементы перерабатываются в более тяжелые. Пока не исчерпались элементы легче железа, энергию в нашей Вселенной будут производить звезды — источники термоядерной энергии. В ходе их горения образуется некоторое количество элементов тяжелее железа — такие, например, как уран. Из этих элементов можно тоже получать энергию. Они нестабильные — энергия их распада известна как ядерная энергия.

Ядерный цикл значительно менее энергоемкий по сравнению с термоядерным. Если, скажем, при термоядерной реакции двух ядер водорода выделяется энергия 4 МэВ, то при распаде ядра урана ^{235}U (которое само по себе в 235 раз тяжелее ядра водорода) индуцированного нейтроном выделяется только 208 МэВ. Это означает, что удельное выделение энергии примерно в 4 раза меньше. Наконец, исчерпаются и ядерные источники энергии, все вещество превратится в железо, которое является наиболее стабильным элементом. Оно не дает выделения энергии при термоядерных реакциях и не распадается с выделением энергии (точнее, оно может распадаться в процессе распада протонов ядра, но это процесс распада именно протонов).

Можно использовать еще энергию, которая будет выделяться при распадах протонов, но при этом вещество, из которого построены, в частности, мы, будет безвозвратно исчезать.

Образуется темная безжизненная Вселенная. Поэтому наша эпоха, эпоха существования биологической жизни, — это тонкий переходный слой от инфляции и «Большого Взрыва» к темному времени.

Наблюдатель, живущий в одной из областей, закрашенной серым цветом, не сможет передать в другую область сигнал, поскольку граница его области лежит в прошлом. На рис. 18.3 схематично показан ход эволюции материи в одном из доменов, в котором инфляция сменилась эпохой «Большого Взрыва». Как может заметить внимательный читатель, эта схема повторяет изложение главы «Различные эпохи нашей Вселенной».

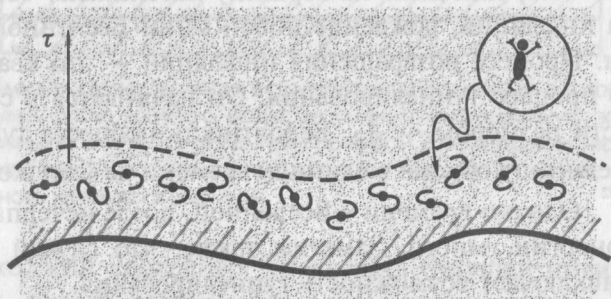


Рис. 18.3. На рисунке изображен ход эволюции в одной из мини-Вселенных в непосредственной близости от границы между белым цветом и серым цветом. В качестве оси времени выбрано время, сопутствующее наблюдателю (пробной частице) в расширяющемся мире. Направление этого времени не совпадает с направлением времени t , но наблюдатель считает, что оно перпендикулярно пространственно-подобной гиперповерхности

Обновляющаяся Вселенная

История Вселенной, показанная на рис. 18.3, подразумевает, что энергия вакуума равна нулю. Недавние подсчеты сверхновых звезд показали, что энергия вакуума в нашей Вселенной может быть не равна нулю (см. главу 16). Присутствие ненулевого Λ -члена (именно он ассоциируется с энергией вакуума) сильно меняет картину нашей большой Вселенной в сверхкрупных (причинно несвязанных) масштабах.

Рассмотрим подробнее структуру Вселенной внутри одного домена, в котором произошла смена инфляции на степенной режим расширения. По мере расширения Вселенной плотность в домене падает до тех пор, пока плотность вещества не станет меньше плотности вакуума (по современным данным в нашей

Вселенной она равна $\sim 10^{-30}$ г/см³). После этого плотность Вселенной будет оставаться примерно равной плотности вакуума, а параметр Хаббла станет равным $H_\Lambda = \sqrt{\frac{\Lambda}{3}}$.

Самое главное состоит в том, что во Вселенной с $\Lambda > 0$ возможен переход из состояния истинного вакуума (впрочем, такой ли уж он теперь истинный?) в состояние на склон потенциала (рис. 18.1) или даже на вершину потенциала. Тогда вновь возможна инфляция, рождение новой мини-Вселенной, повтор эволюции. Процесс возвращения инфляции — это квантомеханический процесс туннелирования. Он начинается в сферической области размером $\sim \frac{1}{H_\Lambda}$. Вероятность процесса туннелирования на единицу объема в единицу времени не слишком велика $P \sim e^{-10^{122}}$. Однако времени у Вселенной, после исчерпания всех запасов энергии, много. Заметим также, что случай нулевого Λ -члена исключает возможность туннелирования.

Передача послания в будущее

Итак, Вселенная может вновь оказаться в фазе сильной инфляции (точнее, часть Вселенной). На рис. 18.4 схематически показано рождение новой фазы (новых мини-Вселенных) инфляции внутри области, расширяющейся уже по экспоненциальному закону. Скорость расширения вновь становится чудовищной, вновь рождается много материальной энергии, уравновешенной гравитационным полем. Фаза ложного вакуума вновь распадается, образуется горячая плазма, процесс рождения и угасания начинается новый круг.

Естественно, новая область Вселенной является причинно несвязанной с другими областями, порожденными в новой инфляционной фазе. Однако послание из нашей области Вселенной вполне может дойти туда. Наши события могут оказывать влияние на процессы в новой мини-Вселенной.

В таком случае какая-либо цивилизация может записать свою накопленную мудрость в книгу книг, поместить ее в дос-

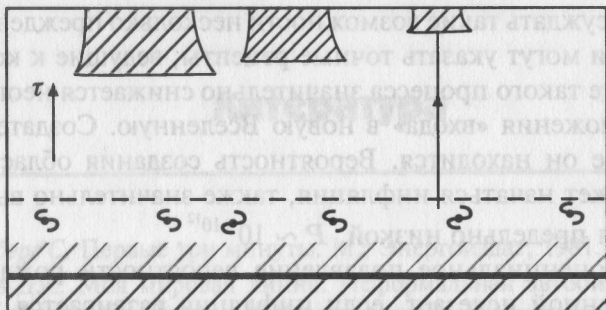


Рис. 18.4. Здесь показана эволюция в одной из мини-Вселенных, в которой Λ -член не равен нулю. Эпоха горячего вещества сменяет инфляционную эпоху, затем наступают темные времена безжизненной Вселенной, в некоторый момент времени появляется фаза вещества с ложным вакуумом (он показан на рисунке штрихами), в котором вновь начинается инфляция

таточно жесткий контейнер¹⁾ и послать будущей цивилизации. Трудность, правда, заключается в том, чтобы «угадать», в каком именно месте пространства и в какой именно момент времени «откроется» вход в новую Вселенную.

Стимуляция рождения Вселенной

Можно не ждать спонтанного рождения Вселенной, а стимулировать ее рождение. Даже в том случае, если направленное создание вселенной окажется невозможным, правильно прикладывая усилия, можно добиться значительного повышения вероятности рождения новой Вселенной.

Спусковым крючком для начала инфляции может оказаться коллапс черной дыры. Коллапс обычной звезды в черную дыру не противоречит никаким физическим принципам, наоборот, скорее это естественный процесс во Вселенной. Многие звезды должны кончать свой жизненный цикл в виде потухших, мертвых черных дыр. Процесс коллапса можно инициировать. Наверно,

¹⁾ Внимательный читатель может сказать, что внутри фазы ложного вакуума никакой контейнер не выдержит... Это будет почти правильно. Мы пока не знаем свойства контейнеров, «сделанных» из суперструн. Цивилизация, однако, может ограничиться посылкой сообщения в виде гравитационных волн или волн скалярного поля.

В ходе такого процесса значительно снижается неопределенность положения «входа» в новую Вселенную. Создатели точно знают, где он находится. Вероятность создания области, в которой может начаться инфляция, также значительно выше, хотя и остается предельно низкой, $P \sim 10^{-10^{12}}$.

В общем, проблем хватает...

Литература

1. Вейнберг С. Первые три минуты. М.: Энергоиздат, 1981.
2. Гамов Дж. Моя мировая линия. Неформальная автобиография. М.: Физматлит; ВО «Наука». 1994.
3. Долгов А. Д., Зельдович Я. Б., Сажин М. В. Космология ранней Вселенной. М.: Изд-во МГУ, 1988.
4. Ефремов Ю. Н. Очаги звездообразования в галактиках. М.: Наука, 1989.
5. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975.
6. Окунь Л. Б. Физика элементарных частиц. М.: Наука, 1988.
7. Сахаров А. Д. Космомикрофизика — междисциплинарная проблема. Координация исследований по космомикрофизике // Вестник академии наук СССР. 1989. № 4. С. 39.
8. Сурдин В. Г. Рождение звезд. М.: Эдиториал УРСС, 2001.
9. Физика космоса. М., 1986.
10. Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум. М.: Наука, 1987.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Что такое космология?	7
Предмет космологии	7
Космология в последние годы XX столетия	9
Недавняя история и перспективы космологии	11
Глава 2. Тесты космологии	14
Расширение нашей Вселенной	14
Реликтовое излучение	23
Крупномасштабная структура Вселенной	25
Распространенность легких элементов	28
Анизотропия реликтового излучения	31
Гравитационные линзы	32
Глава 3. Различные эпохи нашей Вселенной	36
Ранняя Вселенная	36
Наша эра во Вселенной	42
Глава 4. Законы, управляющие эволюцией нашего мира	46
Фридмановская модель	47
Эволюция однородного мира	54
Глава 5. Рождение Вселенной	70
Рождение Вселенной из пены пространства-времени	70
Глава 6. Физика элементарных частиц и космология	82
Поиски единства взаимодействий и элементарных частиц в физике	84
Что такое скалярное поле?	91

Перенормировки в теории элементарных частиц	92
Механизм Хиггса, новое скалярное поле	94
Глава 7. Метафизические проблемы космологии	99
Проблема горизонта	99
Проблема плоскостности	102
Почему расширяется Вселенная?	104
Как образуется расширение по закону Хаббла?	105
Глава 8. Инфляционная Вселенная	107
Решение проблемы горизонта	112
Решение проблемы плоскостности	113
Почему расширяется Вселенная	114
Как образуется расширение по закону Хаббла	116
Окончание инфляционной стадии	117
Глава 9. Возникновение зародышей галактик	121
Возмущения плотности	121
Спектр Зельдовича—Харрисона	125
Гравитационные волны	129
Восстановление потенциала инфляции	133
Глава 10. Модели инфляционной Вселенной	134
«Новый» инфляционный сценарий	135
Вечная или хаотическая инфляция	137
Глава 11. Барионная асимметрия	143
Барионная асимметрия Вселенной	143
Распад протона	145
Протон должен быть нестабильным	147
Горячий бариосинтез	148
Холодный бариогенез	150
Глава 12. Реликтовое излучение	153
Что такое реликтовое излучение	153
Анизотропия реликтового излучения	156
Возмущения плотности и гравитационные волны	166

Поляризация реликтового излучения	170
Измерение вклада гравитационных волн	172
Эффект Сюняева—Зельдовича	173
Перспективы исследований анизотропии	175
Глава 13. Крупномасштабная структура Вселенной	180
Распределение галактик в крупных масштабах . . .	180
Начальная стадия роста возмущений плотности .	181
Нелинейная стадия развития возмущений	183
Большой Аттрактор	192
Глава 14. Темная материя во Вселенной	195
Что такое темная материя?	195
Формы распределения темной материи	197
Поиски частиц темной материи	200
Глава 15. Гравитационные линзы	204
Как устроены гравитационные линзы	206
Несколько примеров гравитационных линз	210
Глава 16. Что открыли астрономы?	214
Ускоренное расширение Вселенной	214
Глава 17. Не хотите ли создать Вселенную?	217
Как создать вселенную?	217
Полузамкнутый мир	219
Рождение нового мира	221
Глава 18. Что нас ждет в будущем?	225
Будущее нашей цивилизации	225
Вечная инфляция	227
Передача послания в будущее	232
Литература	235

Издательство УРСС

специализируется на выпуске учебной и научной литературы, в том числе монографий, журналов, трудов ученых Российской Академии наук, научно-исследовательских институтов и учебных заведений.



Уважаемые читатели! Уважаемые авторы!

Основываясь на широком и плодотворном сотрудничестве с Российским фондом фундаментальных исследований и Российским гуманитарным научным фондом, мы предлагаем авторам свои услуги на выгодных экономических условиях. При этом мы берем на себя всю работу по подготовке издания — от набора, редактирования и верстки до тиражирования и распространения.

Среди недавно вышедших книг мы предлагаем Вам следующие.

Сурдин В. Г. Рождение звезд.

Ефремов Ю. Н. Вглубь Вселенной.

Куликовский П. Г. Справочник любителя астрономии.

Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии.

Ипатов С. И. Миграция небесных тел в Солнечной системе.

Николаев О. С. Физика и астрономия (заключительный курс факультативных практических работ).

Грин Б. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории.

Бааде В. Эволюция звезд и галактик.

Чернин А. Д. Звезды и физика.

Хлопов М. Ю. Космомикрофизика.

Розенталь И. Л. и др. Геометрия, динамика, Вселенная.

Пенроуз Р. Новое мышление императора.

Табор М. Хаос и интегрируемость в нелинейной динамике.

Малинецкий Г. Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент.

Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. Современные проблемы нелинейной динамики.

Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего.

Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. Физика процессов эволюции.

Пригожин И. От существующего к возникающему.

Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса.

Пригожин И., Стенгерс И. Время. Хаос. Квант.

Петров К. П. Аэродинамика транспортных космических систем.

Ляховский В. Д., Болохов А. А. Группы симметрии и элементарные частицы.

Рубаков В. А. Классические калибровочные поля.

Хамермеш М. Теория групп и ее применение к физическим проблемам.

Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика. Т. 1-3.

Квасников И. А. Молекулярная физика.

Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление.

Дубровин Б. А., Новиков С. П., Фоменко А. Т. Современная геометрия. Т. 1-3.

Волобуев И. П., Кубышин Ю. А. Дифференциальная геометрия и алгебры Ли и их приложения в теории поля.

По всем вопросам Вы можете обратиться к нам:
тел./факс (095) 135-44-23, тел. 135-42-46
или электронной почтой urss@urss.ru.
Полный каталог изданий представлен
в Интернет-магазине: <http://urss.ru>

Издательство УРСС

Научная и учебная
литература

Издательство УРСС



Представляет Вам свои лучшие книги:



Сурдин В. Г.

Астрономические задачи с решениями

В книге собрано около 430 задач по астрономии с подробными решениями. Часть из них — классические, часть — совершенно новые. Все решения составлены автором книги и нередко дополняют и даже исправляют ошибки классических решений.

Уровень задач в среднем ниже олимпиадного, хотя отдельные задачи потребуют упорной работы. Абсолютное большинство задач «с изюминкой»: не торопитесь давать ответ, даже если на первый взгляд задача покажется простой.

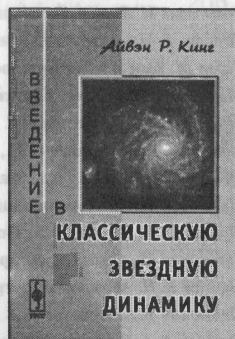
Книгу можно рекомендовать школьникам, изучающим астрономию, географию и природоведение, а также всем любителям астрономии.

Кинг А.

Введение в классическую звездную динамику.

В книге изложены важнейшие вопросы теории орбит, теории потенциала галактик, теории спиральной структуры галактических дисков и приливного взаимодействия звездных систем. Обсуждается движение звезд и эволюция звездных скоплений в галактике, а также строение и эволюция скоплений галактик.

В основу книги положены лекции по динамике звездных систем, которые автор много лет читал студентам Калифорнийского университета в Беркли (США).



**Издательство
УРСС**

Наши книги можно приобрести в магазинах:

«Библио-Глобус» (м. Лубянка, ул. Мясницкая, 6. Тел. (095) 925-2457)

«Московский дом книги» (м. Арбатская, ул. Новый Арбат, 8. Тел. (095) 203-8242)

«Дом научно-технической книги» (Ленинский пр., 40. Тел. (095) 137-0633)

«Дом книги на Соколе» (м. Сокол, Ленинградский пр., 78/1. Тел. (095) 152-6381)

Пролетарская, ул. Марксистская, 9. Тел. (095) 270-5421)

верситет, Воробьевы горы, ДС МГУ. Тел. (095) 939-1263)

т 2001» (м. Университет, 2 гум. к. МГУ. Тел. (095) 939-2176)

а» (С.-Пб., ул. Пушкинская, 2. Тел. (812) 325-3589)

ский пр., 28. Тел. (812) 311-3954)

20317402031061200100

*В книге представлены
достижения космологии
за последние несколько
десятилетий.
Обсуждаются основные
наблюдательные факты,
образующие фундамент
современной науки
о Вселенной в целом,
о ее прошлом и будущем,
а также основные идеи,
лежащие в основании
теории ее строения.
Дана целостная картина,
включающая вопросы
рождения и развития
нашей Вселенной
на самых ранних стадиях,
а также вопросы образо-
вания ее современной
структуры. Обсуждены
проблемы инфляционной
стадии, бариосинтеза,
связи с физикой
элементарных частиц,
реликтового излучения,
крупномасштабной
структуры Вселенной.
Рассмотрен вопрос
ускоренного расширения
нашей Вселенной,
а также явления гравита-
ционного линзирования.*



9 785354 000128 >

НАУЧНАЯ **УРСС**
И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Каталог изданий в Internet: <http://urss.ru>

E-mail: urss@urss.ru

Тел./факс: 7 (095) 135-44-23, 135-42-46